



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Informe: LM-PI-USVT-006-18

Línea de investigación:

Parámetros de tránsito para diseño de pavimentos en la red vial nacional primaria de Costa Rica. Código 321-B5-A41.

Informe Final





Preparado por:

Programa de Infraestructura del Transporte

San José, Costa Rica

Setiembre, 2018



1. Informe LM-PI-USVT-006-18		2. Copia No. 1	
3. Título y subtítulo: Parámetros de tránsito para diseño de pavimentos en la Red Vial Nacional Primaria de Costa Rica. Código 321-B5-A41. Informe Final.		4. Fecha del Informe 28 de setiembre de 2018	
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440			
8. Notas complementarias Proyecto inscrito con el código 321-B5-A41 en la Vicerrectoría de Investigación, según oficio VI-4800-2015.			
9. Resumen En el presente proyecto de Investigación se determinaron los parámetros de carga más representativos para el adecuado diseño estructural de los pavimentos en Costa Rica. La información recopilada servirá como insumo a la Guía de Diseño Estructural de Pavimentos de nuestro país, la cual tendrá como fin modelar el efecto de dichos parámetros en el desempeño de las estructuras de pavimentos y así mejorar las labores de diseño, construcción, reconstrucción y mantenimiento de carreteras. El presente informe presenta, además, un resumen de los informes parciales previamente presentados, mostrando resultados referentes a los parámetros de carga, presión de inflado, desviación lateral de llanta y tránsito vehicular. El desarrollo de esta investigación incluye seis trabajos finales de graduación y tres informes técnicos. La divulgación del proyecto incluyó tres presentaciones en congresos y un artículo publicado en una revista científica.			
10. Palabras clave CARGA, PRESIÓN, DESVIACIÓN LATERAL, TRANSITO VEHICULAR, VELOCIDAD, PAVIMENTOS, MODELACIÓN		11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 103
13. Preparado por:			
Ing. Henry Hernández, MSc Investigador- Unidad de Seguridad Vial y Transporte PITRA  Fecha: 28/09/2018	Giancarlo Umaña Marín Asistente Unidad de Seguridad Vial y Transporte PITRA		
14. Revisado por:		15. Aprobado por:	
Ing. Diana Jiménez Romero, MSc., MBA Coordinadora Unidad Seguridad Vial y Transporte  Fecha: 28/09/2018	Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD Coordinador Unidad Materiales y Pavimentos  Fecha: 28/09/2018	Ing. Guillermo Loría Salazar, PhD Coordinador Programa Infraestructura del Transporte (PITRA-LanammeUCR)  Fecha: 28/09/2018	



Contenido

Resumen Ejecutivo.....	8
1. Antecedentes.....	9
2. Justificación de la investigación.....	11
2.1 Importancia práctica.	11
2.2 Valor teórico y utilidad metodológica.....	11
3. Descripción.....	11
4. Objetivo general.....	12
5. Objetivos específicos.....	12
6. Esquema conceptual	13
7. Fase 1: Encuesta de carga.....	14
Trabajo de graduación: Determinación de patrones típicos de distribución temporal.	15
Informe: Variación del Factor Camión Mediante el Control de Sobrepeso	19
Trabajo de graduación: Espectros de carga asociados a distintos tipos de vehículos pesados en rutas de la red vial estratégica nacional no reguladas por estaciones de pesaje	25
Trabajo de graduación: Desarrollo de espectros de carga para la red vial cantonal ..	27
Fuente: ^a Rodríguez (2018), ^b Arrieta (2017).....	29
Trabajo de graduación: Externalidades ambientales, en seguridad vial y en infraestructura del transporte de carga ferroviaria en la zona atlántica costarricense	30
8. Fase 2: Presión de inflado.....	31
Informe del PITRA-LanammeUCR	32

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 3 de 103
----------------------------	---	-----------------



Trabajo de graduación: Determinación de presión de neumáticos de vehículos de carga típicos de Costa Rica.....38

Trabajo de graduación: Influencia de la presión de inflado en el desempeño de los pavimentos flexibles54

9. Fase 3: Desviación lateral de la llanta57

 Trabajo de graduación: Determinación del desplazamiento lateral de vehículos en carreteras urbanas de Costa Rica.....57

 Trabajo de graduación: Uso de sensores ultrasónicos en la medición de desplazamiento lateral vehicular60

10. Fase 4: parámetros y estadísticos de clasificación vehicular62

 Trabajo de graduación: Determinación de patrones típicos de distribución temporal.62

 Informe de Patrones de Velocidad83

11. Trabajos finales de graduación.....92

12. Divulgación93

Bibliografía.....98



Índice de Figuras

Figura 1. Espectro de Carga.....	10
Figura 2. Esquema Conceptual	13
Figura 3. Puntos de pesaje.....	26
Figura 4. Pesaje realizado en calle municipal en San Ramón	28
Figura 5. Porcentaje de daño por fatiga para sección 70070.....	31
Figura 6. Comparación de neumáticos duales y un supersingle	35
Figura 7. Florida Ice & Farm, C2: Espectro de Presión	41
Figura 8. Florida Ice & Farm, T3-S2: Función de Distribución Acumulada.....	41
Figura 9. Florida Ice & Farm, C2: Espectro de Presión	42
Figura 10. Florida Ice & Farm, C2: Función de Distribución Acumulada.....	43
Figura 11. Búfalo, T3-S2: Espectro de Presión	44
Figura 12. Estación de Búfalo, T3-S2: Función de Distribución Acumulada.....	44
Figura 13. Búfalo, C2: Espectro de Presión	45
Figura 14. Búfalo, C2: Función de Distribución Acumulada.....	46
Figura 15. Ochomogo, T3-S2: Espectro de Presión	47
Figura 16. Ochomogo, T3-S2: Función de Distribución Acumulada.....	47
Figura 17. Estación de Ochomogo, C2: Espectro de Presión.....	48
Figura 18. Ochomogo, C2: Función de Distribución Acumulada.....	49
Figura 19. Esparza, T3-S2: Espectro de Presión	49
Figura 20. Esparza, T3-S2: Función de Distribución Acumulada.....	50
Figura 21. Esparza, C2: Espectro de Presión.....	50
Figura 22. Esparza, C2: Función de Distribución Acumulada.....	51
Figura 23. Influencia de la presión de inflado sobre el área de contacto de un neumático	55
Figura 24. Huella de neumático en un eje de llanta dual	55
Figura 25. Ilustración de la presión de contacto vertical en la huella generada	56
Figura 26. Fotografía de la ubicación de la cámara en la estación de la Ruta Nacional 32.	58
Figura 27. Esquema de las conexiones de todos los módulos y sensores a la tarjeta ArduinoUNO.....	60

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 5 de 103
----------------------------	---	-----------------



Figura 28. Tendencia de los vehículos a transitar a una distancia particular respecto al margen de la vía en la Ruta Nacional 2 ($n_{livianos} = 388$, $n_{pesados} = 124$)..... 61

Figura 29. Patrones horarios del total de vehículos, estación PK+7100..... 63

Figura 30. Estaciones de conteo permanentes, al año 2013, de la Dirección de Planificación Sectorial del Mopt..... 65

Figura 31. Ubicación de estaciones de conteo permanente en la Ruta Nacional 27..... 66

Figura 32. Ejemplo de cuadro de decisión 80

Figura 33. Ejemplo de tabla de factores según mes del año 81

Figura 34. Distribución de velocidades promedio por día de la semana en las estaciones analizadas 89

Figura 35. Distribución de velocidades promedio por día de la semana para estaciones con velocidades promedio más alta los días domingo 90

Figura 36. Distribución de velocidades promedio por día de la semana para estaciones donde el domingo no presenta mayores velocidades 90

Figura 37. Deformación unitaria vertical en la mitad de la capa de mezcla asfáltica, carga aplicada de 60 kN y presión de inflado de 552 kPa 96

Figura 38. Deformación unitaria vertical en la mitad de la capa de mezcla asfáltica, carga aplicada de 60 kN y presión de inflado de 793 kPa 97



Índice de Cuadros

<i>Cuadro 1. Características de las rutas estudiadas</i>	16
<i>Cuadro 2. Factor camión de autobuses</i>	17
<i>Cuadro 3. Factores camión típicos</i>	20
<i>Cuadro 4. Resultados del porcentaje de vehículos que incumplen la regulación de peso</i>	21
<i>Cuadro 5. Resumen de los hallazgos de estabilización del factor común</i>	22
<i>Cuadro 6. Resumen Comparación entre factor camión con incumplimiento constante</i>	23
<i>Cuadro 7. Factores camión obtenidos</i>	29
<i>Cuadro 8. Efectos de factores causantes de cambios de presión de inflado</i>	37
<i>Cuadro 9. Resumen de vehículos con velocidad promedio mayor y menor según el número de ejes para cada estación analizada</i>	85
<i>Cuadro 10. Resumen de vehículos de dos ejes con velocidad promedio mayor y menor según el esquema F de clasificación de FHWA para cada estación analizada</i>	86
<i>Cuadro 11. Día de mayor y menor velocidad promedio para cada estación en estudio</i>	87
<i>Cuadro 12. Hora de mayor y menor velocidad promedio para cada estación en estudio</i>	88
<i>Cuadro 13. Valores de desplazamiento lateral por tipo de vehículo para las rutas muestreadas</i>	95

Resumen Ejecutivo

En el presente proyecto de Investigación se determinaron los parámetros de carga más representativos para el adecuado diseño estructural de los pavimentos en Costa Rica. La información recopilada servirá como insumo a la Guía de Diseño Estructural de Pavimentos de nuestro país, la cual tendrá como fin modelar el efecto de dichos parámetros en el desempeño de las estructuras de pavimentos y así mejorar las labores de diseño, construcción, reconstrucción y mantenimiento de carreteras.

El proyecto se desarrolló en cuatro fases o áreas temáticas:

- Fase 1. Encuesta de Carga,
- Fase 2. Presión de inflado,
- Fase 3. Desviación lateral de la llanta, y
- Fase 4. Parámetros estadísticos de clasificación vehicular.

Para cada fase se presentan estudios previos desarrollados en el LanammeUCR y los resultados obtenidos dentro del proyecto. El presente informe presenta, además, un resumen de los informes parciales previamente presentados, mostrando resultados referentes a los parámetros de carga, presión de inflado, desviación lateral de llanta y tránsito vehicular.

El desarrollo de esta investigación incluye nueve trabajos finales de graduación y tres informes técnicos. La divulgación del proyecto incluyó tres presentaciones en congresos y un artículo publicado en una revista científica.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 8 de 103
----------------------------	---	-----------------

1. Antecedentes

En el año 2004, la Unidad de Investigación del Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) del LanammeUCR, inició una revisión y análisis de la Guía de Diseño Mecanicista - Empírico 2002 de Estados Unidos. Actualmente, se está en proceso de desarrollar una guía calibrada para las condiciones nacionales.

Para esto, la Guía de Diseño Mecanicista - Empírico requiere insumos relacionados con el suelo, materiales, clima, tráfico y estructura de pavimento. En el PITRA-LanammeUCR se han estado implementando proyectos relacionados con las variables más importantes de dicha guía, incluyendo los siguientes temas: zonificación climática, uso de materiales no tradicionales, uso de granulometrías discontinuas, desempeño en deformación permanente, fatiga, resistencia al daño por humedad, módulo resiliente y curva maestra en mezclas asfálticas, variación estacional de módulos, módulos resilientes y deformación permanente sobre materiales cohesivos, granulares y estabilizados y la caracterización de pesos por tipo de vehículo mediante la encuesta de carga. En los últimos años las necesidades a las que deben responder los pavimentos han acrecentado su severidad en cuanto a cargas, velocidades y condiciones climáticas.

Para modelar las cargas correctamente es necesario determinar la frecuencia, velocidad, volumen y clasificación vehicular de la flotilla en cada proyecto. Los parámetros anteriores son necesarios para determinar la cantidad de vehículos de cada tipo que están transitando diariamente, pues en general sólo los vehículos más pesados son de interés para el diseño de pavimentos (el daño generado por los vehículos livianos es marginal). La velocidad del tráfico también es importante conocerla, pues los materiales que componen los paquetes estructurales pueden tener un comportamiento visco-elástico y por tanto sus propiedades dependen de la velocidad y frecuencia de las cargas a las que están sujetos. Por esto, es necesario determinar perfiles de velocidad para los vehículos de diseño.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 9 de 103
----------------------------	---	-----------------

Además, Allen (2013) indica que el LanammeUCR utilizó los datos de estaciones de pesaje con el objetivo de generar parámetros de carga para el diseño de pavimentos. Se definieron espectros de carga por tipo de eje y tipo de vehículo, con lo que fue posible obtener los espectros de carga para las principales carreteras del país. En la Figura 1 presenta un ejemplo de la información generada gráficamente a partir del proceso de análisis de los datos recopilados.

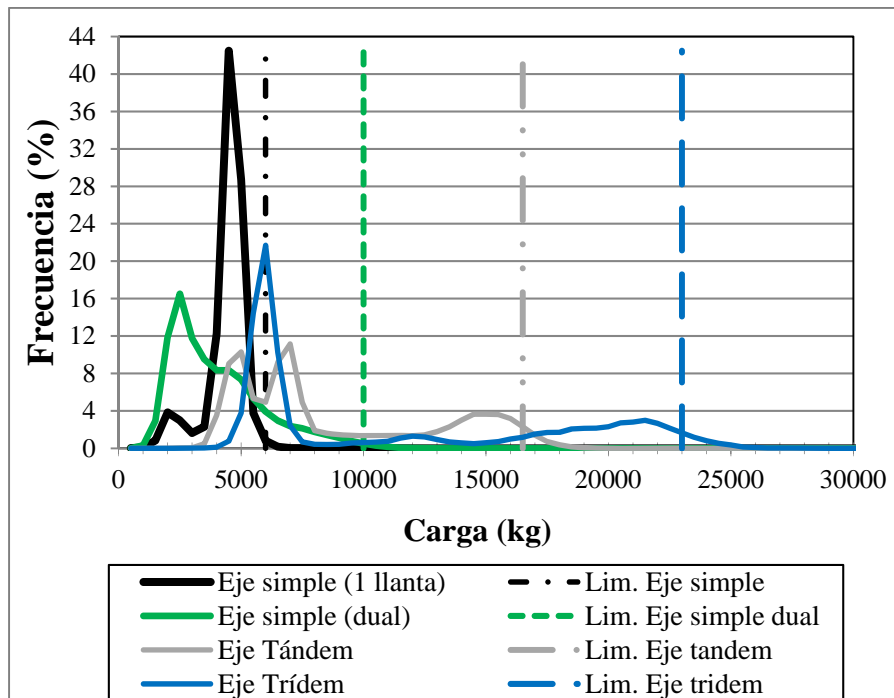


Figura 1. Espectro de Carga.

Fuente: Allen y Badilla, 2011

De esta y otras investigaciones que se realizan actualmente en la Unidad de Materiales y Pavimentos-PITRA, surge la necesidad de formular una Línea de Investigación macro sobre el tema Parámetros de Carga de modo que sirva de insumo a la futura Guía de Diseño Estructural de Pavimentos para Costa Rica (Allen, 2013).



2. Justificación de la investigación

2.1 Importancia práctica.

Allen (2013) explica que la macro-investigación brindará información relativa a parámetros de carga y a su modelación para incorporarse a la Guía de Diseño Estructural de Pavimentos para Costa Rica, la cual resulta sumamente necesaria, dado que el país no cuenta con una guía calibrada y debe diseñarse con guías extranjeras, provocando que en muchas ocasiones se dé un mal cálculo de espesores y por lo tanto un uso no adecuado de los recursos.

2.2 Valor teórico y utilidad metodológica.

La propuesta de investigación busca a su vez desarrollar conocimiento y experiencia en temas como:

- Diseño de experimentos de recopilación de parámetros de carga in situ.
- Análisis estadístico y desarrollo de distribuciones estadísticas de los parámetros tránsito.
- Modelación estructural avanzada en software de elemento finito.
- Calibración de modelos de deterioro con ensayos a escala natural.

3. Descripción

El Proyecto de Investigación de los Parámetros de Carga surge de la necesidad de un adecuado diseño de pavimentos en el país. Para que esto se dé "es importante caracterizar las cargas de tránsito, los materiales y su variación en el entorno geológico y climático; y definir los criterios de falla acorde con la realidad en cada caso: país, región o macro-región" (Allen, 2013).

En este informe se sintetizan los aspectos generales y resultados del proyecto de investigación, en el cual se recopila y analiza información de campo sobre cuatro principales parámetros a tomar en cuenta en el diseño de las carreteras: la carga, la presión de inflado, la desviación lateral y la clasificación vehicular, recopilados

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 11 de 103
----------------------------	---	------------------

por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), o contenidos en proyectos finales de graduación de estudiantes de la Universidad de Costa Rica.

4. Objetivo general

Determinar y cuantificar las propiedades de los principales parámetros de carga requeridos en el diseño estructural de pavimentos que actualmente imperan sobre el comportamiento de las rutas nacionales primarias en Costa Rica, que servirán como insumo para la modelación de su efecto en el desempeño de las estructuras de pavimentos y así mejorar las labores de diseño, construcción, reconstrucción y mantenimiento de carreteras.

5. Objetivos específicos

- Caracterizar los espectros de carga, por tipo de vehículo y tipo de eje, para la red vial nacional primaria.
- Recopilar y analizar la información de la distribución de carga en un neumático para la modelación de la distribución de esfuerzos que recibe el pavimento de acuerdo a la presión de inflado.
- Recopilar y analizar la información de las desviaciones laterales de las llantas ("wheel wander") o distribución de las cargas de las ruedas de los vehículos pesados para la generación de un modelo estadístico de distribución de las desviaciones laterales de las llantas de los camiones y autobuses.
- Recopilar información y estimar parámetros y estadísticos de clasificación vehicular para la Red Vial Nacional Primaria de Costa Rica, mediante herramientas estadísticas.
- Recopilar información y estimar parámetros y estadísticos de la velocidad de operación de los vehículos para la Red Vial Nacional Primaria de Costa Rica.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 12 de 103
----------------------------	---	------------------

6. Esquema conceptual

En la siguiente figura se muestran los principales factores de carga que afectan el desempeño estructural de un pavimento en los que se basa la propuesta de investigación.

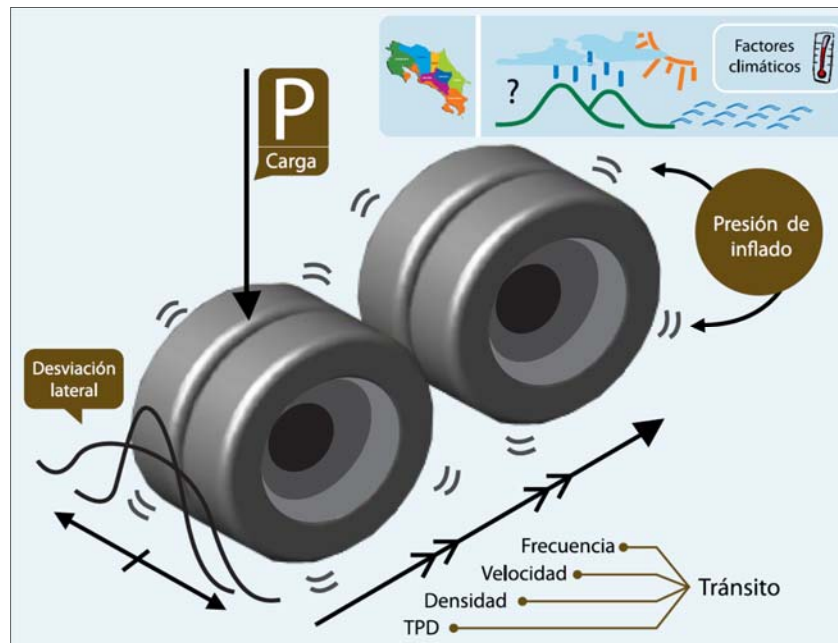


Figura 2. Esquema Conceptual

Fuente: LanammeUCR, 2012

Según explica Allen (2013) la Carga (P) se entiende como la magnitud de carga, la desviación lateral de la llanta se refiere a la distribución estadística de la posición lateral del eje central de cada pasada de llanta en un carril específico, la presión de inflado indica el estado de inflado de las llantas. Mientras que los parámetros de tránsito (frecuencia, velocidad, densidad y tránsito promedio diario o TPD) establecen la cantidad de vehículos de diseño, así como la velocidad o frecuencia de la carga.

Para modelar las cargas correctamente es necesario conocer la frecuencia, velocidad, volumen y clasificación vehicular de la flotilla en cada proyecto; ya que

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 13 de 103
----------------------------	---	------------------



es preciso identificar la cantidad de vehículos de cada tipo que están transitando diariamente, pues en general sólo los vehículos más pesados son de interés para el diseño de pavimentos (el daño generado por los vehículos livianos es marginal). La velocidad del tráfico y la presión de inflado de las llantas de los mismos también es importante conocerla, pues los materiales que componen los paquetes estructurales pueden tener un comportamiento visco-elástico y por tanto sus propiedades dependen de la velocidad, frecuencia y temperatura a que fueron aplicadas las cargas a las que están sujetos. Por esto, es necesario determinar perfiles de velocidad para los vehículos de diseño.

7. Fase 1: Encuesta de carga

El PITRA-LanammeUCR colaboró con el proyecto de graduación de Espinoza (2013), titulado *“Determinación de Factores Camión y Espectros de Carga Representativos de autobuses Urbanos e Interurbanos para diseño de pavimentos flexibles en carreteras de Costa Rica”*. Además se realizó un informe (Allen, Vargas, & Sánchez, 2015) titulado *“Análisis exploratorio de la variación del factor camión mediante el control de sobrepeso en el transporte de carga para el diseño de pavimentos de Costa Rica”*, a cargo de la Unidad de Gestión Municipal del LanammeUCR.

El estudio aplicado en vehículos pesados formó parte de los trabajos de graduación de los estudiantes de ingeniería civil Arrieta-Rojas (2017) y Rodríguez-Solano (2018) titulados: *“Espectros de carga asociados a distintos tipos de vehículos pesados en rutas de la red vial estratégica nacional no reguladas por estaciones de pesaje”* y *“Desarrollo de espectros de carga para la red vial cantonal”*, respectivamente. Además, en el campo de transporte ferroviario, se desarrolló el trabajo de graduación del estudiante Mata-Díaz (2018) llamado *“Externalidades ambientales, en seguridad vial y en infraestructura del transporte de carga ferroviaria en la zona atlántica costarricense”*.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 14 de 103
----------------------------	---	------------------



Trabajo de graduación: Determinación de patrones típicos de distribución temporal

En su proyecto de graduación Espinoza (2013) cita las siguientes características que debe cumplir el pavimento para garantizar la seguridad y eficiencia en el transporte de personas y cargas:

- Superficie uniforme e impermeable.
- Resistencia a cargas cíclicas y medio ambiente.
- Disminución de los esfuerzos transmitidos al suelo.

Es por esto que para determinar el daño provocado al pavimento, resulta conveniente utilizar el factor camión (FC) el cual "permite conocer el daño que los ejes de cada vehículo le generan al pavimento, y corresponden a la suma de los factores de equivalencia de carga LEF (*load equivalency factors*) de cada vehículo" (Arias-Barrantes, y otros, 2014). Gracias al factor camión, se puede proporcionar el daño sufrido en el pavimento de una zona con el causado por un vehículo en particular.

Usualmente no se encuentra calculado el factor camión para los autobuses a pesar de que este tipo de vehículos requiere una consideración importante al diseñar carreteras, debido no solo a que la magnitud de su peso genera un daño mayor al de los vehículos convencionales, sino que al ser uno de los principales modos de transporte del país, el daño que provocan es constante y repetitivo.

Para el caso del pesaje de los autobuses, Espinoza aclara que las variaciones que se presentan pueden ser causadas por la configuración del autobús (ya que estos se ven afectados por el peso propio y el tipo de ejes) y la cantidad de pasajeros, que depende de la hora del día, pues para rutas urbanas lo usual es que exista una mayor cantidad de personas utilizando este medio de transporte en las horas pico. Sin embargo, en los autobuses interurbanos el comportamiento suele ser diferente,

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 15 de 103
----------------------------	---	------------------



ya que según estudios realizados por las empresas que brindan el servicio, al ser lo normal que salgan de su estación con la mayoría de sus asientos ocupados, la variación va a estar dada por el día de la semana, el mes o si es semana de pago. Además, considerando que los autobuses interurbanos también transportan equipaje, el peso suele ser mayor, por lo que el muestreo se hizo para ambos tipos de autobús en las rutas que se detallan a continuación.

Para seleccionar las rutas utilizadas en el muestreo, se escogieron las que son usadas por autobuses urbanos e interurbanos, basándose en el tráfico promedio diario específico de estos y en el número de líneas de servicio obtenidos gracias a conteos vehiculares suministrados por ProDUS (Espinoza, 2013). En la siguiente tabla se describen las rutas seleccionadas:

Cuadro 1. Características de las rutas estudiadas

Ruta	Ubicación de la ruta	Detalles de la ruta	Ubicación de puntos de muestreo
2	Inicia en el Parque Metropolitano La Sabana y finaliza en el sector de Paso Canoas	-	De autobuses urbanos: Curridabat frente a la Fundación Neotrópica. De autobuses interurbanos: Ochomogo, en las estaciones de pesaje del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (Mopt) y en la Lima de Cartago.
32	Inicia en Barrio Tournón en San José y finaliza en la provincia de Limón en las cercanías del muelle Alemán	Ruta con alto porcentaje de vehículos pesados	San Miguel de Santo Domingo de Heredia, específicamente en el cruce de San Luis ya que se enfoca en autobuses interurbanos.
218	Entre barrio La California en San José hasta barrio la Turbina en Cartago	Brinda servicio a centros de población como Guadalupe, Moravia y Coronado.	Cerca de la iglesia de Jesucristo de los Santos de los Últimos Días, en el Alto de Guadalupe ya que se enfoca en autobuses interurbanos.

Fuente: Modificado de Espinoza, 2013



Para los puntos detallados se realizaron muestreos durante cuatro meses: desde abril hasta julio del año 2013, durante los cuales se realizaron cuatro pesajes por mes, dos para cada tipo de autobús, variando cada mes el sentido de circulación. También se realizaron conteos vehiculares, con cortes de 15 minutos, durante 10 horas desde las 7:30 am, el factor de cantidad de pasajeros no fue tomado en consideración ya que no era factible mantener el autobús detenido por largos periodos.

Resultados de la encuesta de Carga

Espinoza (2013) indica que para el cálculo de los factores camión de cada vehículo se asumió un numero estructural (SN por sus siglas en inglés) de cinco, el cual corresponde a la capacidad de un pavimento para resistir las cargas bajo las condiciones consideradas en su diseño, y una pérdida de capacidad del pavimento para proveer un adecuado servicio a los vehículos que lo transitan, lo cual se conoce como pérdida de serviciabilidad (P_t) de 2,5 con lo cual se obtuvieron los valores para cada tipo de vehículo y para cada una de las rutas analizadas que se muestran a continuación:

Cuadro 2. Factor camión de autobuses

	Factor camión		
	Mínimo	Promedio	Máximo
MOPT/CONAVI	1,25	1,71	2,29
Clasificación			
Urbanos	0,17	1,02	3,86
Interurbanos	0,48	2,88	5,64
Ruta			
No. 218	0,22	1,01	2,35
No. 032	0,33	2,90	5,64
No. 002-Total	0,17	1,19	4,63
No. 002-Curridabat	0,17	0,85	3,06
No. 002-Ochomogo y La Lima	0,32	1,83	4,63
Total	0,17	1,34	5,64

Fuente: Espinoza, 2013

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 17 de 103
----------------------------	---	------------------

Para comparar las medias del Factor Camión en los diferentes sitios, se efectuó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95 %, con el objetivo de determinar si hay alguna diferencia estadística significativa entre los factores camión de los grupos que se utilizaron como muestras. Espinoza (2013) resume algunos de los resultados encontrados a continuación:

- Existe una diferencia significativa entre las medias de los factores camión de cada grupo de autobuses comparados.
- En la mayoría de los casos, las medias de los factores camión de un sitio, calculados en un mes son iguales a los factores calculados en el mismo sitio durante otro mes. Con la excepción de las rutas 218 (abril a junio) y 32 para mayo y junio.
- Solo la Ruta Nacional 218 presentó diferencias significativas dependiendo del sentido de circulación. Lo que indica que en ciertas rutas es necesario hacer una distinción por sentido.

Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con Espinoza (2013) se puede concluir que:

- Los factores utilizados por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (Mopt) y el Consejo Nacional de Vialidad (Conavi) no son representativos para la flota de autobuses de Costa Rica. El factor camión es mayor en aquellas rutas que tienen una mayor presencia de autobuses interurbanos, por lo tanto, el factor promedio utilizado por los entes gubernamentales sobreestima las cargas para autobuses urbanos y las subestima en el caso de los interurbanos.
- La cantidad de pasajeros, equipaje y el tamaño de los autobuses interurbanos causa que el 42 % de los ejes delanteros y el 65 % de los ejes traseros excedan el límite de peso establecido.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 18 de 103
----------------------------	---	------------------



- El factor de equivalencia de carga aumenta de forma exponencial al aumentar el peso por eje, por lo que los vehículos con sobrepeso someten al pavimento a grandes esfuerzos, lo que acelera el proceso de falla.
- La variación en el peso del autobús debido a su ocupación (personas) puede variar entre los 600 kg y 5 toneladas, aumentando el peso del autobús hasta en un 40 %.
- La mayoría de los autobuses interurbanos que presentaron sobrepeso en alguno de sus ejes durante la encuesta de carga no transportaban pasajeros de pie, lo que indica que la sobrecarga es debida principalmente al tipo de vehículo.
- Debido a la variación espacial de la flota vehicular no puede utilizarse un factor camión único en el país. Sin embargo, debido al costo no es viable realizar estudios de pesaje en cada ruta, por lo que deben determinarse para las principales rutas y aplicarse a las otras que presenten una similitud.
- Existen lineamientos nacionales que delimitan el peso; sin embargo, se carece de sistemas de control y sanción.

Informe: Variación del Factor Camión Mediante el Control de Sobrepeso

Los vehículos pesados presentan la mayor influencia en el deterioro de los pavimentos al transmitir cargas mayores. Por esta razón, el pavimento se diseña considerando dichas cargas. Sin embargo Allen, Vargas y Sánchez (2015) aclaran que si los vehículos pesados presentan sobrepeso la calzada debe soportar cargas mayores a aquellas para las que fue diseñada, aumentando el deterioro de la carretera de manera exponencial. Es por esto que el informe analizó si la regulación de carga por parte del gobierno ha generado alguna variación favorable (reducción del peso) del factor camión para los vehículos tipo C2, C3, T3-S2 y T3-S3 en las rutas nacionales que disponen de sistemas de control de peso para vehículos pesados.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 19 de 103
----------------------------	---	------------------



En el año 2007 se comenzó a estudiar las cargas a las cuales se someten los pavimentos nacionales por medio de encuestas de carga. El documento desarrollado por Ulloa, Allen, Badilla, & Sibaja (2008) establece que el exceso de peso en los vehículos repercute negativamente en el desempeño de los pavimentos, acelerando el deterioro de las vías, con la investigación se obtuvieron además los factores camión típicos por tipo de vehículo, ruta y eje, los cuales se muestran a continuación.

Cuadro 3. Factores camión típicos

Ruta	Tipo de vehículo					
	Pickup	C2+	C2	Bus-C2	C3	T3-S2
Ruta 1 - General Cañas (peaje)	0,011	0,019	0,734	2,022	2,721	2,102
Ruta 1 - Bernardo Soto Naranjo (peaje)	0,011	0,016	0,902	3,68	1,971	3,701
Ruta 1 - Bernardo Soto Esparza (peaje)	0,011	0,233	0,723	2,911	2,834	4,153
Ruta 2 - Florencio del Castillo (peaje)	0,015	0,031	0,827	1,437	3,202	3,021
Ruta 2 -Pérez Zeledón (tránsito)	0,012	0,014	0,446	1,858	3,33	2,08
Ruta 27 - Próspero Fernández (peaje)	0,011	0,016	1,163	1,957	3,155	2,695
Ruta 32 - Braulio Carrillo (peaje)	0,011	0,022	0,695	3,692	2,271	4,229
Ruta 140 - San Carlos (Ciudad Quesada-	0,012	0,014	0,521	2,107	3,773	3,861
Promedio	0,012	0,046	0,751	2,458	2,907	3,23
Desviación estándar	0,001	0,076	0,223	0,861	0,585	0,878

Fuente: Ulloa, Allen, Badilla, & Sibaja, 2008

El estudio realizado por Allen y Badilla (2011) mostró una tendencia a la estabilización y a la baja de los porcentajes de vehículos que excedían la regulación de peso oficial de Costa Rica, la cual se rige por el Decreto Ejecutivo 31363-MOPT titulado “*Reglamento de Circulación por Carretera en base en el Peso y las Dimensiones de los Vehículos de Carga*”.

Porcentaje de vehículos que incumplen la regulación de peso

Allen, Vargas y Sánchez (2015) estudiaron el comportamiento del porcentaje de vehículos de carga que exceden la regulación nacional de peso por medio de



análisis mensuales para cada tipo de vehículos según el número de ejes. A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

Cuadro 4. Resultados del porcentaje de vehículos que incumplen la regulación de peso

Tipo de vehículo	Tipo de eje	
C2	Simple	
	Ecuación	Comentario
	$y = 0.698x^{-0.93}$ $R^2 = 0.794$	Se presenta una disminución importante en el porcentaje de vehículos con exceso de carga a lo largo del periodo analizado.
	Dual	
	$y = 3.230x^{-0.81}$ $R^2 = 0.753$	Al igual que en el caso anterior se evidencia una disminución importante en el porcentaje de vehículos con exceso de carga a lo largo del periodo analizado.
C3	Simple	
	$y = 9.774x^{-0.67}$ $R^2 = 0.832$	Se da una marcada disminución en el porcentaje que excede la regulación y se alcanza un porcentaje de vehículos con exceso estabilizado.
	Tándem	
	$y = 6.197x^{-0.32}$ $R^2 = 0.502$	Igual al caso simple
T3-S2	Simple	
	$y = -0.001x + 0.073$ $R^2 = 0.374$	Se mantuvo constante en todo el periodo de análisis.
	Tándem	
	$y = 7.624x^{-0.23}$ $R^2 = 0.435$	Se da una disminución en el porcentaje de incumplimiento
T3-S3	Tridem	
	$y = 6.003x^{-0.25}$ $R^2 = 0.247$	Se evidencia una disminución en el porcentaje de exceso durante los primeros 9 meses de análisis, posteriormente el comportamiento se mantiene constante con una mínima tendencia a la baja.

Fuente: Modificado de Allen, Vargas y Sánchez, 2015. Nota: La variable y corresponde al porcentaje de incumplimiento de peso promedio de vehículo determinado y la variable x corresponde al mes en el cual se realizó la medición iniciando con un valor de x= 1 iniciando en noviembre del 2008 y finalizando en octubre del 2011.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 21 de 103
----------------------------	---	------------------



Factor Camión

El factor camión se analizó según el tipo de vehículo únicamente. En el Cuadro 5 se resumen los hallazgos referentes a la tendencia y estabilización de los factores camión resultantes en vehículos C2, C3, T3-S2, T3-S3.

Cuadro 5. Resumen de los hallazgos de estabilización del factor común

Tipo de vehículo	Ecuación	FC (proyectado mes 36)	Estabiliza	Comentarios
C2	$FC=0,43263*x^{-0.228682}$	0.1906	sí	Se evidenció un comportamiento decreciente en el valor del factor camión hasta alcanzar valores relativamente estables, para el año 2011. El modelo de regresión lineal cumple con los supuestos de normalidad, homogeneidad e independencia de los residuos.
C3	$FC=1,11331*x^{-0.154178}$	0.6407	sí	Se evidenció una tendencia hacia la estabilización, pues los valores de factor camión disminuyen en forma constante; aunque menos marcada para el 2011; mostrando un aumento significativo. El modelo de regresión lineal verifica todos los supuestos de los residuos.
T3-S2	$FC=1,60268*x^{-0.098874}$	1.1245	sí	Los factores camión tienden a bajar alcanzando valores estables en los últimos meses del periodo de análisis.
T3-S3	$FC=1,98712*x^{-0.085254}$	1.4640	sí	Los factores camión mostraron una disminución significativa durante el 2009; pero durante el 2010-2011 se mostró una aleatoriedad significativa de los valores y una mínima tendencia a la baja.

Fuente: Modificado de Allen, Vargas y Sánchez, 2015. Nota: La variable x corresponde al mes en el cual se realizó la medición iniciando con un valor de $x=1$ iniciando en noviembre del 2008 y finalizando en octubre del 2011 (mes36).



Discusión de resultados

En el siguiente cuadro, se muestra el resumen de las ecuaciones más significativas para la determinación del factor camión encontradas, en esta se hace la comparación entre el factor camión con incumplimiento cero, con incumplimiento constante y potencial. El factor camión potencial se infiere a través de series de tiempo proyectadas elaboradas mediante regresión potencial en el mes 36. El factor camión de incumplimiento constante se calcula usando una regresión lineal múltiple entre el factor camión y el incumplimiento en uno o varios ejes y sustituyendo en la ecuación el valor de incumplimiento constante para cada uno de los vehículos de carga, mientras que el factor camión de incumplimiento de 0 % se calcula mediante el intercepto de las regresiones realizadas entre el factor camión y el incumplimiento de uno o varios ejes.

Cuadro 6. Resumen Comparación entre factor camión con incumplimiento constante

Vehículo	Eje de inferencia	Ecuaciones FC vs. %Exceso	R ²	%Exceso Estabilizado del estudio	FC incumplimiento 0% (lineal)	FC incumplimiento constante
C2	Dual	FC = 0,1165*Exd. + 0,1802	0,929	0,17	0,18	0,20
C3	Simple	FC = 0,0857*Exd. + 0,5781	0,849	0,97	0,58	0,66
T3-S2	Tándem	FC = 0,073*Exd. + 0,92	0,714	3,72	0,92	1,19
T3-S3	Simple	FC = 0,998*Exc_sim + 0,0149*Exc_tan + 0,0434*Exc_tr+1,10	0,615	0,07	1,1	1,54
	Tándem			15,59		
	Trídem			3,26		
T3-S3 (Inferencias con Tándem T3-S2)	Simple			0,07		1,37
	Tándem			3,72		
	Trídem			3,26		

Fuente: Allen, Vargas y Sánchez (2015)



En el cuadro anterior se muestran las ecuaciones utilizadas para obtener los diferentes valores de factor camión, de donde se obtuvo que el factor camión calculado mediante regresión y estabilización del incumplimiento de peso presenta una relación significativa con el factor camión calculado mediante el modelo potencial. El factor camión aumenta al incrementarse la cantidad de ejes articulados del vehículo de carga y se evidencian, además, diferencias de hasta 25 % entre los factores camión con incumplimiento constante y con incumplimiento cero.

De los análisis realizados a vehículos de carga T3-S3, se concluye que es posible disminuir los valores de factor camión de hasta 0,17 al exigir controles más estrictos y eficientes sobre el exceso de carga en el eje tándem del vehículo T3-S3.

Conclusiones

- Se determinó que la implementación de controles de pesaje en las rutas nacionales produce un efecto de estabilización en los factores camión y en el porcentaje de incumplimiento.
- El vehículo T3-S3 en su eje tándem no mostró evolución en la estabilización del incumplimiento, pero estabilizó en forma general el factor camión en el periodo de análisis.
- Los vehículos C2, C3, T3-S2, T3-S3 estabilizaron a factores camión de 0,19-0,64-1,12-1,46 respectivamente, por medio de series de tiempo con regresión potencial, y estabilizaron a valores de 0,2-0,66-1,19-1,54 respectivamente a través de la estabilización del porcentaje de vehículos con incumplimiento de peso en sus ejes y regresiones lineales entre el factor camión y el porcentaje de vehículos con incumplimiento en los ejes.
- Se debe de considerar la evolución de los factores camión generales obtenidos, ya que se podría sobreestimar un diseño al usar factores camión que no correspondan a los reales.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 24 de 103
----------------------------	---	------------------



Recomendaciones

- Realizar una validación de las inferencias realizadas en el informe por medio de series de tiempo para el periodo de 2011-2014.
- Elaborar espectros de carga por cada tipo de eje para cada modelo de vehículo y para cada estación de control en ambos sentidos de circulación de forma que se muestren los porcentajes de vehículos que transiten con cierta cantidad de carga.

Trabajo de graduación: Espectros de carga asociados a distintos tipos de vehículos pesados en rutas de la red vial estratégica nacional no reguladas por estaciones de pesaje

En este proyecto, Arrieta (2017) determinó espectros de carga para vehículos pesados en diferentes rutas nacionales, que forman parte de la red estratégica nacional y no cuentan con estaciones de pesaje. Para analizar los vehículos realizó una clasificación por número de ejes, teniendo los tipos C2+, C2, C3, C4, T3-S2 y T3-S3.

La selección de las zonas se realizó considerando el documento de Allen y Vargas (2014), se tomaron en cuenta las rutas con mayor presencia de vehículos pesados y sin estaciones de pesaje fijas:

- Ruta Nacional 1, Esparza-Paraíso
- Ruta Nacional 32, Santo Domingo de Heredia
- Ruta Nacional 1, Barranca
- Ruta Nacional 2, Casa Mata
- Ruta Nacional 2, Ochomogo
- Ruta Nacional 141, Naranjo
- Ruta Nacional 34, Pozón-Orotina



Figura 3. Puntos de pesaje

Fuente: Arrieta (2017)

Conclusiones y recomendaciones

Como conclusiones y recomendaciones, Arrieta (2017) enlista:

- Del total de vehículos encuestados (639) cerca del 16 % exceden el límite de peso establecido en el Decreto Ejecutivo N° 31363-MOPT.
- Las vías en las que se presentaron la mayor cantidad de vehículo son sobrepeso son: la Ruta Nacional 1, específicamente en Barranca, con



33,6 %; la Ruta Nacional 2, en Ochomogo, con 21 %; y la Ruta Nacional 32, en la zona de Santo Domingo, con 15 %.

- Los vehículos que transportaban materiales de tajo presentaron el mayor porcentaje de sobre peso, con 96 %; seguido por los encargados del transporte de combustibles con un 45 % y con un 31 % los transportistas de productos de agricultura.
- Tomando en cuenta la clasificación de vehículos pesados por su cantidad de ejes, se determinó que los vehículos tipo T3-S3, T3-S2 y los C3 son los que presentaron mayor excedencia en el peso máximo establecido, evidenciándose un patrón y una relación directa entre número de ejes y porcentaje de excedencia.
- Los valores de factor camión obtenidos difieren de los estimados por el Mopt-Conavi en 20 % para los C3 y hasta un 95 % para los C2+.
- Sería importante aumentar la cantidad de estaciones de control de pesaje con sistemas fijos, sobre todo en rutas donde la circulación de vehículos pesadas es alta.
- Sería de importancia que en el futuro se desarrollen investigaciones para determinar el efecto de la implementación de estaciones de pesaje, en la vida esperada de las vías intervenidas.
- Para el diseño de pavimentos se debería procurar utilizar valores de cargas reales, mediante la utilización de básculas móviles o estáticas.

Trabajo de graduación: Desarrollo de espectros de carga para la red vial cantonal

Con este proyecto, Rodríguez (2018) determinó factores camión y espectros de carga de algunas rutas cantonales del país, mediante encuestas de carga con

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 27 de 103
----------------------------	---	------------------

pesajes móviles. El muestreo se realizó en seis rutas cantonales y solamente se consideraron vehículos pesados tipo C2, C3, T3-S2 y T3-S3.

La selección de los cantones se realizó considerando el estudio de Allen y Vargas (2014), se tomaron municipios con alto flujo de vehículos pesados y con diferentes actividades económicas. Dichos cantones fueron:

- Alajuela (Alajuela)
- Flores (Heredia)
- Pococí (Limón)
- San Ramón (Alajuela)
- Miramar (Puntarenas)
- Grecia (Alajuela)



Figura 4. Pesaje realizado en calle municipal en San Ramón

Fuente: Rodríguez (2018)

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 28 de 103
----------------------------	---	------------------



El resumen de los factores camión obtenidos por Arrieta (2017) y Rodríguez (2018) se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 7. Factores camión obtenidos

Tipo de vehículo	Rutas Municipales ^a	Rutas Nacionales sin regulación permanente ^b	Mopt-Conavi
C2	0,24	0,39	1,00
C3	1,08	1,16	1,45
T3-S2	1,01	1,67	2,70
T3-S3	1,26	2,14	-

Fuente: ^aRodríguez (2018), ^bArrieta (2017)

Conclusiones

Rodríguez (2018) concluye lo siguiente:

- En los cantones analizados, el vehículo pesado visto con mayor frecuencia fue el C2 con un 62,85 %; seguido por C3 y T3-S2 con aproximadamente 17 % cada uno.
- Del total de vehículos censados, solamente el 7,8 % excedía el límite de peso establecido por normativa.
- De los vehículos con sobrepeso, el 43,64 % son tipo C3, relacionados con vagonetas que transportan material de tajo; seguido por los T3-S2 con un 34,13 %, relacionados con carga de materiales de construcción.



- Los factores camión y espectros de carga varían para mismos tipos de vehículos en cada punto del país.
- Los factores camión obtenidos son menores a los estimados por el Mopt-Conavi y los presentes en el estudio de LanammeUCR en 2007.
- A partir de los espectros de carga se determinó que algunos vehículos tipo T3-S2 excedían la carga permitida por eje debido a la mala distribución de la misma, a pesar de no sobrepasar el peso vehicular bruto.

Trabajo de graduación: Externalidades ambientales, en seguridad vial y en infraestructura del transporte de carga ferroviaria en la zona atlántica costarricense

Este proyecto tenía como finalidad analizar el impacto en emisiones de CO₂, la cantidad de choques y el deterioro del pavimento en la Ruta Nacional 32 ocasionado por el cambio de modo de transporte de carga. Se analizaron tres casos asumiendo una captura del ferrocarril del 5 %, 10 % y 15 % de la carga que actualmente transita por la Ruta Nacional 32, además del escenario donde el tren sale de operación.

Por ejemplo, en cuanto a los efectos sobre el pavimento, Mata (2018) concluye que aumentar la captación de viajes del tren en un 15 % generaría un cambio en la cantidad de ejes equivalentes que debe soportar el pavimento en dos órdenes de magnitud. En dicho escenario, la vida útil del pavimento variaría entre 3 y 18 meses, aumentando entre un 2,5 % y 15 % la vida de diseño.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 30 de 103
----------------------------	---	------------------

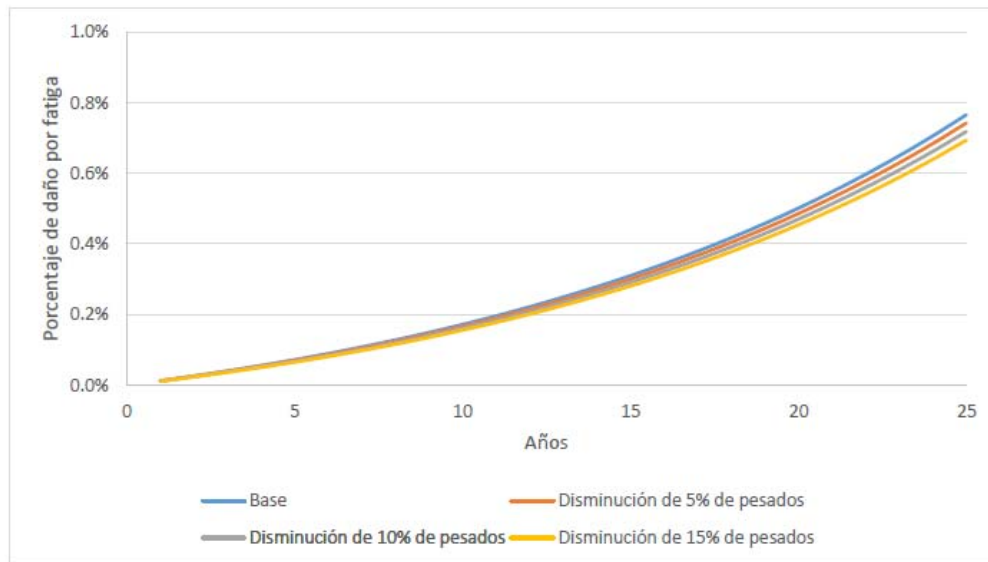


Figura 5. Porcentaje de daño por fatiga para sección 70070

Fuente: Mata (2018)

8. Fase 2: Presión de inflado

Para el estudio de la presión de inflado de los neumáticos de los automóviles en Costa Rica se cuenta con el informe realizado por el PITRA-LanammeUCR denominado: “*Presión de inflado de los neumáticos y la forma en que afecta la estructura del pavimento*”, que busca determinar la evolución histórica y el estado actual en cuanto al conocimiento sobre la medición de la presión de inflado y el aporte que tiene esta en el deterioro de las carreteras del país, aprovechando las investigaciones realizadas a nivel internacional para utilizar conclusiones aplicables a la realidad actual de Costa Rica.

Además, el PITRA-LanammeUCR colaboró con el proyecto de graduación de Sibaja (2014), que estudia el parámetro presión de inflado, con el principal objetivo de generar espectros de carga para los vehículos tipo T3-S2 y C2. También brindó



apoyó al estudiante de ingeniería civil Daniel Clark Araya en el desarrollo de su trabajo final de graduación titulado “*Análisis de la influencia de la presión de inflado en el desempeño de los pavimentos flexibles*” (Clark D. , 2016).

Informe del PITRA-LanammeUCR

Neumáticos y presión de inflado

Allen & Sibaja (2014) mencionan que al aumentar los límites máximos de peso permitidos por eje no solo se dio la sustitución de los neumáticos diagonales (tipo bias-ply) por los radiales, sino que la *American Association of State Highway Officials* (antes llamada AASHO y actualmente AASHTO) creó una carretera de prueba en la que los vehículos transitaban con presiones de entre 75 y 80 libras por pulgada cuadrada (psi, por sus siglas en inglés), con la cual surgieron estudios que demostraron la viabilidad de utilizar presiones mayores.

Al aumentar o variar la presión de inflado es necesario analizar cómo va a afectar esto a los neumáticos y pavimentos. Allen & Sibaja (2014) describen como la presión de inflado del neumático afecta la forma en que este se desempeña y su área de contacto con la carretera, ya que si la presión es menor a la adecuada provoca que los extremos de la banda entren en contacto con la superficie de rodamiento, causando desgaste en las paredes e incremento en la temperatura de la llanta causada por la flexión excesiva, lo que puede provocar una falla en las capas que componen la estructura de la llanta. Por otro lado, si se da un aumento en la presión, la rigidez de la llanta disminuye el área de contacto entre la superficie de este y el pavimento: para un aumento de presión de 50 % el área de contacto neta se disminuye entre un 8 % y 20 %, lo que causa inestabilidad en el vehículo.

Aunque normalmente se asumen que el área de contacto del neumático con el pavimento es circular, "la forma verdadera del área de contacto de un neumático se desvía principalmente a un área elipsoidal debido a la forma de la banda de

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 32 de 103
----------------------------	---	------------------



rodadura y los hilos de refuerzo de los que se componen los neumáticos bias-ply aproximan a una elipse mientras que los neumáticos radiales asemejan un rectángulo" (Allen & Sibaja, 2014).

Allen & Sibaja (2014) concluyen basándose en Huang (2003) que la rigidez ante la flexión se ve sumamente influenciada por la presión de inflado que tenga el neumático, por lo que al alterar la presión de inflado va a variar la distribución de la presión.

Fernando, Musani, Park y Lui (2006) señalan que estudios realizados respaldan que en los neumáticos radiales las presiones de contacto tienden a ser más uniformes que en neumáticos diagonales, ya que estos últimos suelen producir elevadas concentraciones de esfuerzos, por lo que se deduce que los neumáticos radiales tienden a ser menos dañinos para el pavimento que los diagonales en cuanto a lo que presión de inflado se refiere.

Presión de Inflado y Pavimentos

Allen & Sibaja (2014) mencionan que al aumentarse la carga que los ejes deben soportar, se ha dado la tendencia de aumentar la presión de inflado, lo que disminuye el área de contacto entre el neumático y la superficie de la carretera. Esto lleva a una disminución en la fricción que siente el neumático y un incremento de esfuerzos en el neumático, lo que contribuye al deterioro de los pavimentos flexibles, que se evidencia en ahuellamiento bajo la huella del neumático, donde puede acumularse el agua arriesgando la seguridad vial de las carreteras (Kim, Bell, & Wilson, 1989) lo cual hace evidente la importancia de considerar la presión de inflado al momento de diseñar los pavimentos.

Sistemas de presión de inflado central

En un sistema de presión de inflado central el conductor puede variar la presión mientras se encuentra conduciendo. El uso de presiones de inflado variables en el

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 33 de 103
----------------------------	---	------------------



lastre o pavimentos asfálticos delgados permite reducir las vibraciones del vehículo, lo que permitiría minimizar los costos de mantenimiento de las carreteras y neumáticos (Owende, Hartman, Ward, Gilchrist, & O'Mahony, 2001), ya que al adaptarse la presión de inflado a las cargas y velocidad que tenga, se reducen las deformaciones estructurales, esto se explica ya que las presiones bajas permiten reducir el agrietamiento, lo que aumenta la vida útil del pavimento y permite reducir la sub base granular hasta en un 10 % (Allen & Sibaja, 2014).

Las altas presiones de inflado reducen la deflexión y el esfuerzo que siente el neumático, aumentando la vida útil de este y reduciendo la resistencia al rodamiento, lo que conlleva a un ahorro en combustible. Sin embargo también provocan variaciones en el esfuerzo de contacto entre el pavimento y el neumático, que a su vez causan desgastes diferenciales en el neumático (Owende, Hartman, Ward, Gilchrist, & O'Mahony, 2001).

Por estas razones se considera que utilizar presiones de inflado que varíen con la carga y el tipo de pavimento reducen el daño que causan los vehículos.

Neumáticos “Supersingle”

Según estudios, ya que los neumáticos supersingle o de base ancha tienen un área mayor de contacto con el pavimento generan mayores esfuerzos verticales y transversales a lo largo del pavimento. Pruebas de campo llevaron a conclusiones similares, ya que se encontró que los neumáticos de base ancha inducen mayores esfuerzos verticales de compresión en todas las capas, mayores esfuerzos de tensión en la capa inferior del asfalto y cerca del doble de ahuellamiento que los neumáticos duales bajo las mismas cargas y presión de inflado. Además se determinó que la vida útil del pavimento se redujo una cuarta parte al utilizar los neumáticos de base ancha en comparación de los duales, y que estos son más dañinos que los duales por un factor de 2,3 a 4 para las mismas condiciones de presión de inflado y carga (Kim, Salgado, & Altschaeffl, 2005).

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 34 de 103
----------------------------	---	------------------



Figura 6. Comparación de neumáticos duales y un supersingle

Fuente: (Elhanan, 2013)

Respuesta y desempeño del pavimento: Ahuellamiento y Fatiga

Allen & Sibaja (2014) explican que las presiones de inflado elevadas aumentan especialmente el agrietamiento que se da por fatiga, además de la forma y profundidad de los ahuellamientos.

Para los ejes simples, los tipo tándem y los direccionales se da la respuesta del pavimento ante el ahuellamiento debajo del área de contacto de los neumáticos con el pavimento, por lo que la respuesta crítica se encuentra cerca del borde del ancho del neumático para presión de inflado baja y para presiones altas se da en el centro del área de contacto (Gillespe, y otros, 1993).

Ahuellamientos en Pavimentos Flexibles

Said & Hakim (2012) definen el ahuellamiento como una deformación excesiva de las capas de asfalto que aumenta con el incremento de carga que siente el pavimento por el movimiento de vehículos, y es ocasionado por dos mecanismos:

- **Densificación:** es una disminución en el volumen y por ende aumento de densidad de la capa de concreto asfáltico bajo cargas de tránsito repetitivas.
- **Deformación por cortante:** provoca desplazamientos de material causados por el tráfico vehicular que provocan esfuerzos de cortante.

Allen & Sibaja (2014) mencionan que al darse un aumento de presión de 70 a 130 libras por pulgada cuadrada (psi por sus siglas en inglés), la profundidad del ahuellamiento promedio (en la superficie, no producto de una deformación en la subrasante) aumenta alrededor de un 40 %, y que el desempeño ante el ahuellamiento no presenta una relación significativa con el espesor de la capa asfáltica, por lo que se puede concluir que el espesor de la carpeta asfáltica no va a tener una incidencia con el control del ahuellamiento de la estructura.

El hecho de que la presión de inflado no presenta una relación importante con el ahuellamiento a causa de una deformación de la subrasante, pero si lo haga con la formación del este en la capa asfáltica, es un indicador del que el efecto de la presión de inflado se limita a una profundidad cercana a la superficie del pavimento, por lo que puede verse como una solución el utilizar materiales asfálticos de mayor rigidez, ya que mitigarían el efecto de la presión de inflado de los neumáticos (Wang F. , Mechanistic-Empirical Study of Effects of Truck Tire Pressure on Asphalt Pavement Performance, 2005).

Vehículos de carga en Texas y encuestas de Carga en Egipto

En el estudio “*La presión de inflado de los neumáticos de camiones circulando por el estado de Texas*” (Wang & Machedehl, 2003), estudiaron entre otras cosas, los

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 36 de 103
----------------------------	---	------------------



factores que provocan las alteraciones en la presión de inflado que se resumen a continuación.

Cuadro 8. Efectos de factores causantes de cambios de presión de inflado.

Factor	Efecto
Temperatura del neumático	Influye en la presión del neumático ya que en verano la presión va a ser mayor que en el invierno debido a las más altas temperaturas presentes en el ambiente y por lo tanto en los pavimentos.
Carga por eje	Presenta una diferencia significativa de presión de inflado entre los camiones cargados y los vacíos, ya que el peso extra va a ejercer un esfuerzo de compresión adicional sobre el neumático aumentando la presión
Área geográfica	El tipo de autopistas y las direcciones de estas varían los efectos que sufran los neumáticos, ya que va a variar el tipo de bienes y productos, y por lo tanto las cargas, que transporten los camiones en las diferentes regiones geográficas.
Comparación de Ejes tipo 3-S2 (T3-S2 para Costa Rica)	El eje direccional posee una presión de inflado promedio por eje mucho mayor a los demás ejes, mientras que el eje tándem del centro posee entre ambos ejes una variación prácticamente inexistente. En el eje tándem trasero existen variaciones significativas entre los ejes, por lo que se concluye que el eje direccional del vehículo T3-S2 es el más dañino para la estructura del pavimento.
Distancia de viaje	La presión de inflado es directamente proporcional a la distancia que va a recorrer el vehículo, ya que para viajes con distancias muy largas se suele aumentar la presión de inflado del neumático, lo cual representa mayores daños potenciales para el pavimento.

Fuente: Modificado de Espinoza, 2013

Conclusiones y Recomendaciones

Allen y Sibaja (2014) llegan a varias conclusiones, entre las que se destacan las siguientes:

- Los neumáticos radiales son los que predominan en el mercado sobre los bias-ply, ya que, al poder soportar una mayor carga, son los más utilizados por los conductores de vehículos pesados.



- La presión de inflado en los neumáticos influye negativamente en el pavimento, debido a que problemas como el ahuellamiento y agrietamiento por fatiga pueden empeorar si transitan vehículos con presiones de inflado no adecuadas.
- Se recomienda ajustar los factores camión para el país, específicamente para la presión promedio de vehículos de carga, y de esta manera reducir el daño que generan sobre el pavimento.
- Se recomienda elaborar e implementar reglamentaciones que sancionen el uso de presiones de inflado que se salgan de los límites admisibles.

Trabajo de graduación: Determinación de presión de neumáticos de vehículos de carga típicos de Costa Rica

Sibaja (2014) abarca el estudio de la presión de inflado desde una perspectiva más práctica, buscando los índices de presión para los neumáticos en los camiones tipo T3-S2 y C2. Sin embargo, debido al alcance de la investigación, se seleccionaron específicamente tres estaciones de pesaje del Consejo Nacional de Vialidad (Conavi), elegidas gracias al análisis de los datos sobre los pesos y dimensiones de los vehículos de carga permitidos para el tránsito en la Red Vial Nacional y las estaciones de pesaje activas, facilitados por el Conavi. En cuanto a la elección de la empresa utilizada en la investigación, se buscó que dispusiera de una flotilla considerable de los vehículos de estudio.

Este proceso se dio en la primera etapa del proyecto, que corresponde a la búsqueda y análisis de la información existente con respecto a la presión de inflado. La segunda etapa consistió en la instauración del método de muestreo.

Sibaja (2014) explica que no existe una diferencia significativa entre los vehículos T2-S2, más allá de la longitud de la carreta que porten, mientras que los C2 pueden diferenciarse por su tamaño y se clasifican por carga pesada y liviana, poseen

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 38 de 103
----------------------------	---	------------------

además la ventaja de ser fácilmente diferenciables ya que los vehículos de carga pesada inician su matrícula con C y los de carga liviana comienzan con CL.

Allen y Vargas (2014) detallan las estaciones de muestreo seleccionadas y la empresa elegida para el estudio, que se describen a continuación:

- Estación de pesaje de Esparza: ubicada sobre la Ruta Nacional 1, de aproximadamente 290 km de largo, es una carretera de gran relevancia turística y que comunica rutas nacionales e internacionales, utilizada generalmente para el transporte masivo de productos, esta estación controla los vehículos pesados que circulan de Esparza a San Ramón.
- Estación de pesaje de Búfalo: ubicada sobre la Ruta Nacional 32 (Carretera Braulio Carrillo), de 157 km aproximadamente de largo, con una gran relevancia turística y utilizada para el transporte masivos de productos a causa de su conexión con el puerto marítimo del Atlántico de Limón, esta estación de pesaje controla los vehículos pesados que circulan de Limón a San José y viceversa.
- Estación de pesaje de Ochomogo: ubicada sobre la Ruta Nacional 2 (Autopista Florencio del Castillo), al ser una carretera primaria posee un alto tránsito vehicular, con relevancia turística y como ruta de interconexión, utilizada para transporte masivo de productos en el Gran Área Metropolitana (GAM), esta estación controla los vehículos que transitan de Cartago a San José.
- Empresa Florida Ice & Farm: dedicada a comercializar bebidas esta empresa elabora, envasa y vende gran variedad de bebidas tanto dentro como fuera del país, por lo que recurre a una amplia flotilla de camiones para transportar sus productos y la hacen ideal para realizar el estudio.

En la tercera etapa se realizó el análisis estadístico y los espectros de presión. Sibaja (2014) detalla cómo los pesos por eje se obtuvieron en la estación por medio

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 39 de 103
----------------------------	---	------------------



de un "parte" que se encuentra a ambos lados del vehículo que contiene el peso de cada eje, excepto en la estación de pesaje de Búfalo ya que en esta se muestran los pesos totales por eje y para Florida Ice & Farm donde se tomaron los pesos por ejes, las presiones y temperatura en las llantas, así como el tipo y marca de las mismas. Para realizar el análisis, Sibaja (2014) señala que se consideró que aquellos vehículos cuyos ejes direccionales estén en un rango de entre 90 y 110 psi, así como los camiones cuyos ejes de tracción y trasero doble que estén entre 80 y 100 psi, cumplen con los rangos de presión, dando un rango de tolerancia de ± 10 psi que considere la aleatoriedad entre los tipos de neumáticos y temperaturas que pudieron afectar la presión de inflado.

Una vez analizados y comparados los datos obtenidos se concluyó que en general los vehículos C2 no deben considerarse en el mismo rango de presiones ya que presentan una gran variación dependiendo del modelo y dimensiones, dadas las diferencias entre vehículos pesados y de carga liviana. Mientras que los vehículos tipos T3-S2 suelen cumplir en su mayoría en el rango de presión recomendada.

Espectros de presión

Como explica Sibaja (2014), se determinaron las frecuencias de cada estación de pesaje por medio de espectros de presión de cada visita y los totales por tipo de eje calculados con los datos recopilados en cada estación, lo cual permitió encontrar las diversas características y conclusiones para cada zona, entre las que se destacan las siguientes:

Florida Ice & Farm

En la siguiente figura se muestran las frecuencias de los tres tipos de ejes para los vehículos tipo T3-S2 donde Sibaja (2014) describe como se da una concentración entre 90 y 105 psi, el eje direccional presenta su máximo entre los 100 y 115 psi, el eje tándem intermedio tiene su máximo entre a 95 y 105 psi mientras el eje tándem

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 40 de 103
----------------------------	---	------------------

trasero lo tiene entre los 85 y 90 psi, por lo que cada eje se encuentran dentro de los límites de presión aceptables.

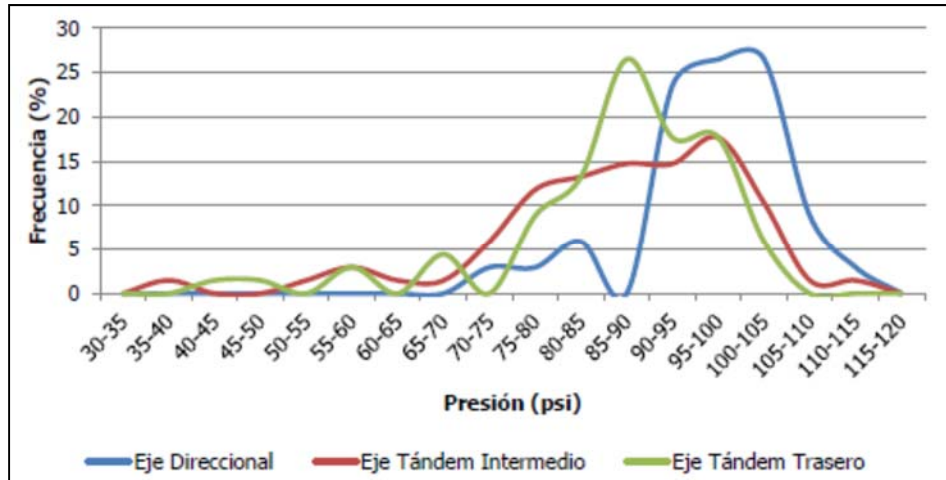


Figura 7. Florida Ice & Farm, C2: Espectro de Presión

Fuente: Sibaja, 2014

En la Figura 8 se muestra la distribución acumulada para todos los tres tipos de ejes, donde es evidente que la presión en todos los casos presentó un comportamiento adecuado ya que se mantiene dentro de los límites preestablecidos.

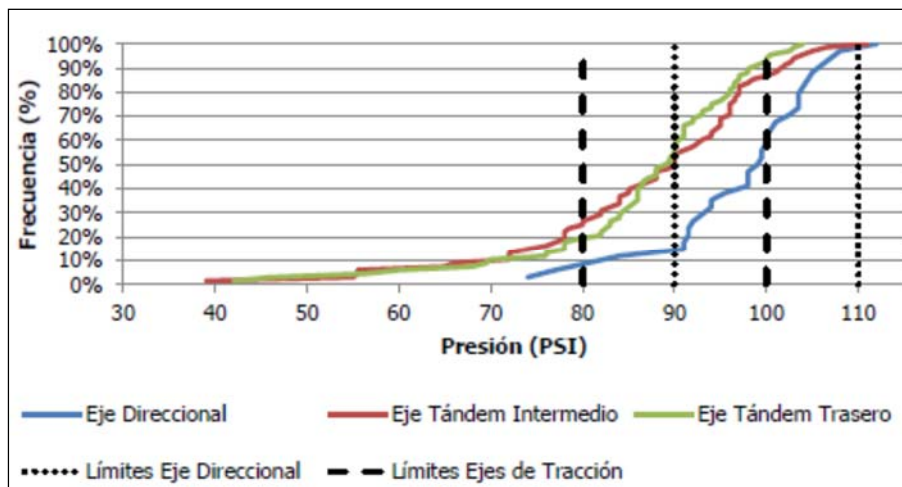


Figura 8. Florida Ice & Farm, T3-S2: Función de Distribución Acumulada

Fuente: Sibaja, 2014

Al realizar el espectro de presión total de los vehículos tipo C2 se observa que los ejes direccionales presentan el pico de presión entre los 95 a 100 psi, mientras los de eje trasero lo presentan entre los 90 a 95 psi, por lo que se encuentra dentro de los límites aceptables. Para esta clasificación la muestra es uniforme ya que la empresa estudiada cuenta solamente con vehículos tipo C2 (Sibaja, 2014), como se observa en la Figura 9 y Figura 10 a continuación.

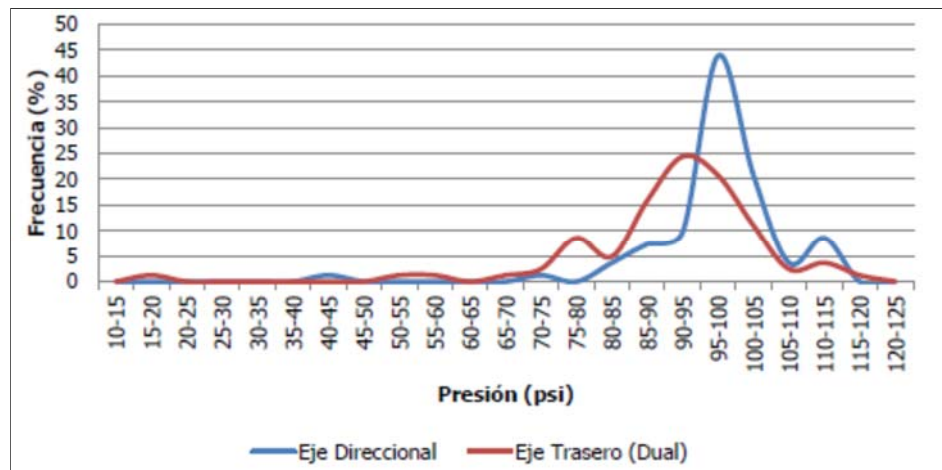


Figura 9. Florida Ice & Farm, C2: Espectro de Presión

Fuente: Sibaja, 2014

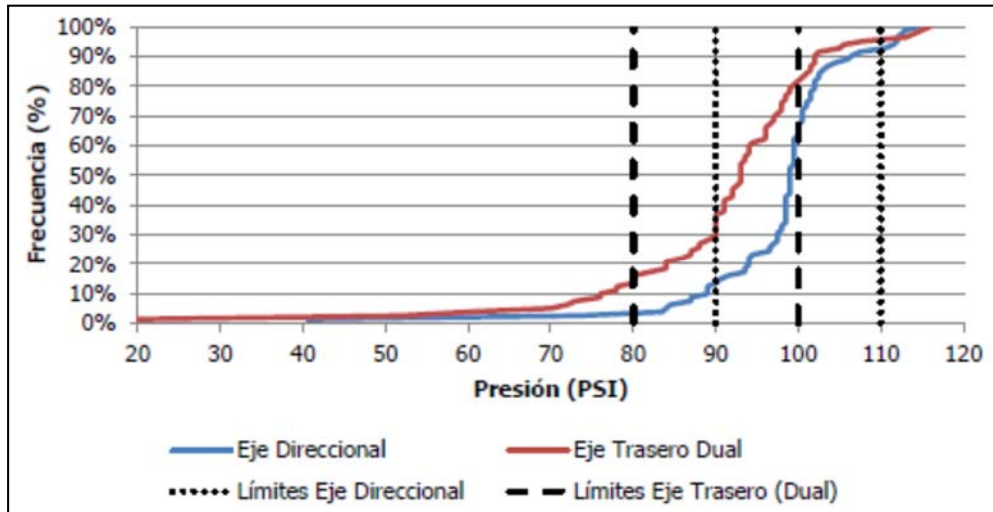


Figura 10. Florida Ice & Farm, C2: Función de Distribución Acumulada

Fuente: Sibaja, 2014

Estación de Pesaje de Búfalo

Sibaja (2014) describe cómo esta estación de pesaje presentó una distribución irregular, con múltiples "picos" que poseen frecuencias porcentuales muy similares para distintas presiones.

En la Figura 11 se observa que el eje direccional es el que muestra un comportamiento más estable, teniendo sus puntos máximos entre los 90 y 105 psi, los cuales se encuentran dentro de un rango aceptable, el eje tándem intermedio presenta su frecuencia porcentual mayor a una presión de 95 a 100 psi, teniendo sin embargo un máximo secundario a una presión de 85 a 90 psi. El eje tándem trasero es el que presenta la distribución más irregular, sin embargo, su pico máximo se encuentra dentro del rango aceptable al estar en entre 85-90 psi.

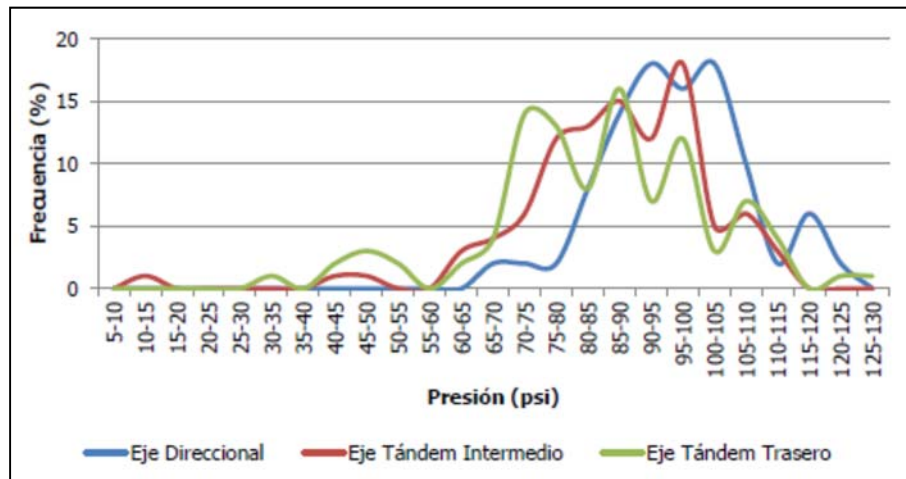


Figura 11. *Búfalo, T3-S2: Espectro de Presión*

Fuente: Sibaja, 2014

Como se observa en la Figura 12, que muestra la función de distribución acumulada, en el caso de los ejes direccionales cerca de un 60 % de los datos de frecuencia se mantuvieron dentro de los límites de presión recomendadas, mientras que solamente lo hicieron aproximadamente un 40 % de los ejes tándem traseros (Sibaja, 2014).

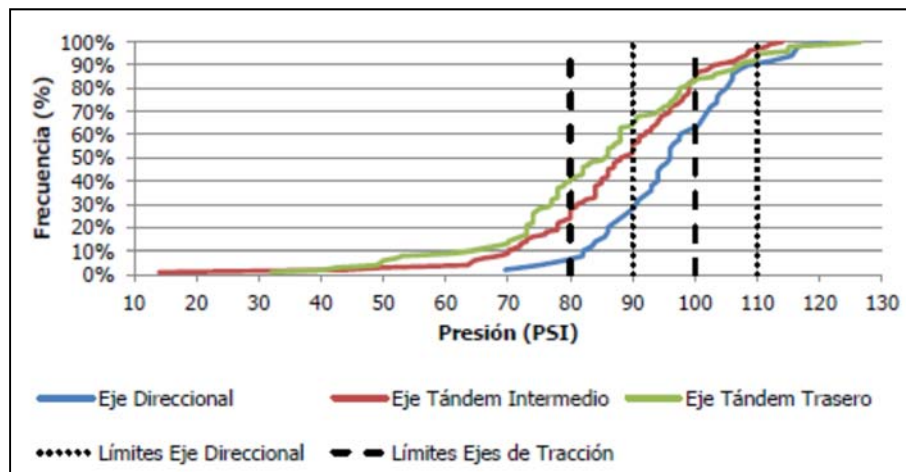


Figura 12. *Estación de Búfalo, T3-S2: Función de Distribución Acumulada*

Fuente: Sibaja, 2014

Los vehículos tipo C2 presentan un comportamiento de "picos" principales dobles (Figura 13), esto podría deberse a que se hizo la muestra con vehículos C2 de carga ligera y carga pesada (que presentan recomendaciones mayores de presión que los de carga liviana), ya que aunque no hay diferencia en la carga que transportan utilizan un tipo diferente de neumáticos, se observa que para los dos tipo de ejes se presentaron presiones menores a la de los límites preestablecidos (Sibaja, 2014).

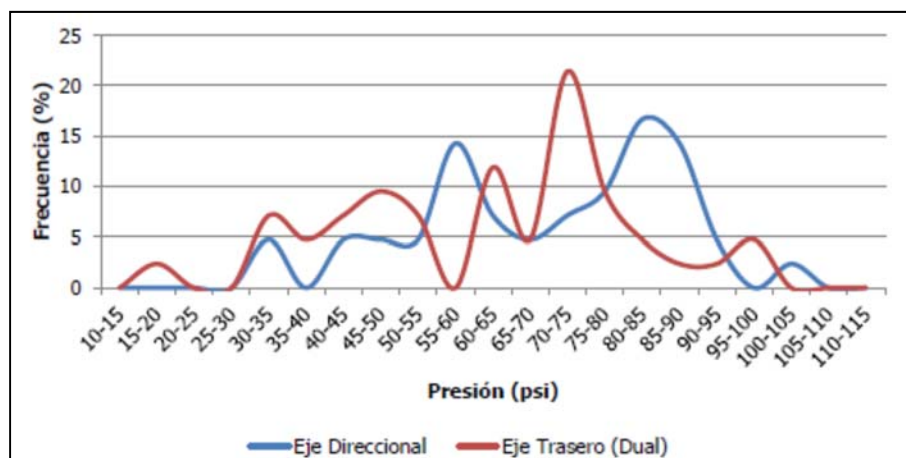


Figura 13. Búfalo, C2: Espectro de Presión

Fuente: Sibaja, 2014

Sibaja (2014) comenta como cerca del más del 50 % de los vehículos de ejes direccionales poseen presiones menores al límite inferior, y lo mismo ocurre con el 45 % de los ejes traseros duales, esto se aprecia de mejor manera en la Figura 14.

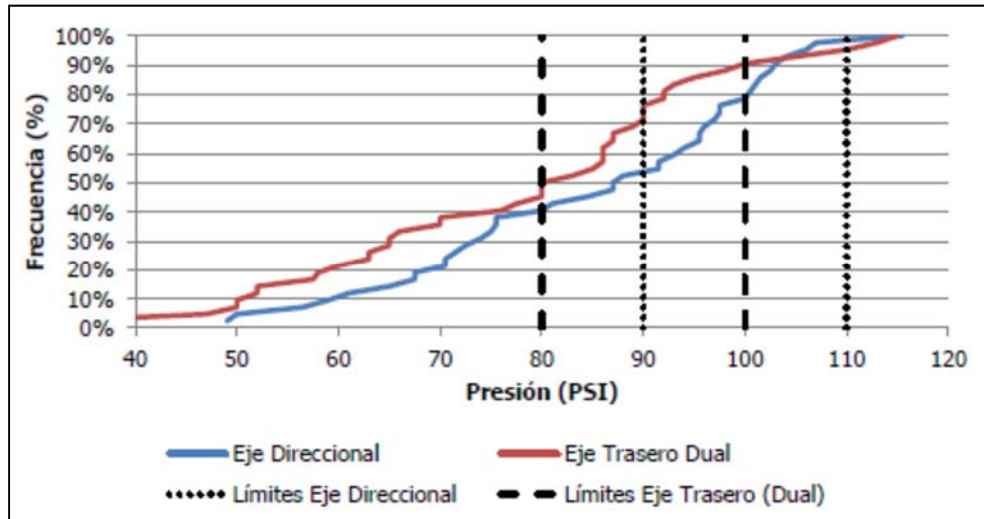


Figura 14. Búfalo, C2: Función de Distribución Acumulada

Fuente: Sibaja, 2014

Estación de Pesaje de Ochomogo

Esta estación, según Sibaja (2014) se caracterizó por presentar valores de presión bastante constantes a lo largo de los tres meses de muestreo, por lo que se tiene un solo punto máximo de presión para los vehículos de ejes direccionales y de ejes tipo tándem trasero. Para los de ejes tipo tándem intermedio se obtuvieron dos valores máximos de porcentaje de frecuencia muy similares para dos intervalos de presión diferentes, estando los "picos" de los tres tipos de ejes dentro de los límites aceptables como se muestra en la Figura 15 y Figura 16, es esta última se observa además que más del 70 % de los ejes direccionales y de tracción se encuentran dentro de los límites establecidos.

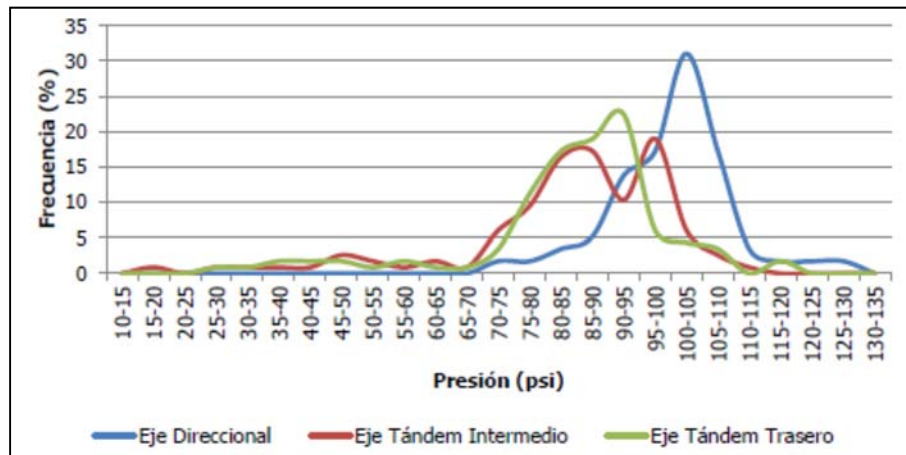


Figura 15. Ochomogo, T3-S2: Espectro de Presión

Fuente: Sibaja, 2014

Como se mencionó anteriormente, en la siguiente figura se muestra como se da un comportamiento muy cercano al recomendado para los tres tipos de ejes analizados, alcanzando valores de hasta 80 % de cumplimiento en las presiones para los ejes direccionales.

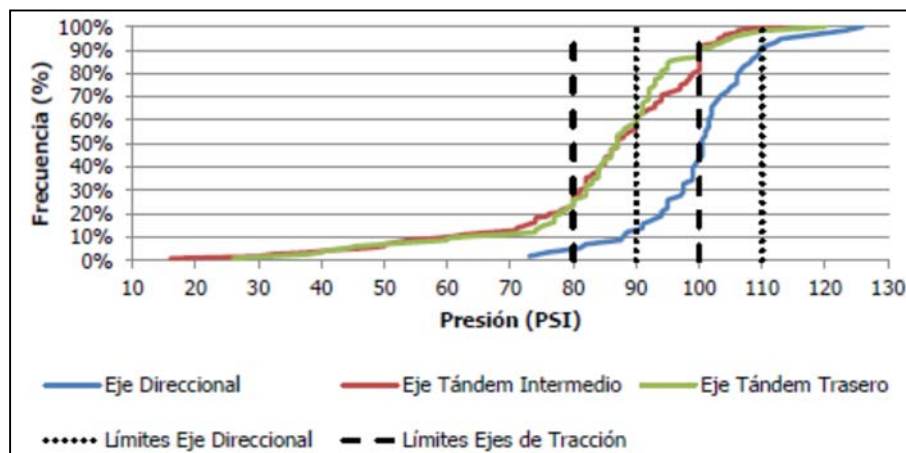


Figura 16. Ochomogo, T3-S2: Función de Distribución Acumulada

Fuente: Sibaja, 2014

Para los vehículos tipo C2 se dio un espectro de presión con un comportamiento de "pico" doble para los dos tipos de ejes como se aprecia en la Figura 17, según Sibaja (2014) esto se explica por la diversidad en tipos y modelos que se dan en este tipo de camiones, y aunque los picos más cercanos tienen valores muy similares a los rangos que estipula el Mopt, los otros presentan presiones sumamente alejadas a los recomendados lo cual Sibaja (2014) explica como consecuencia de una falta de interés por parte de los conductores por cumplir con los requerimientos de presión estipulados.

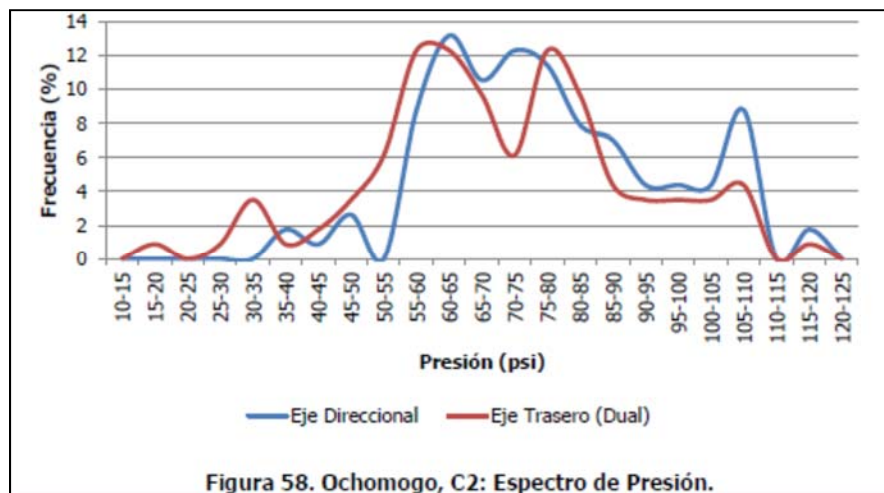


Figura 17. Estación de Ochomogo, C2: Espectro de Presión

Fuente: Sibaja, 2014

Cuando se analiza la distribución acumulada mostrada en la Figura 18 se evidencia que los vehículos tipo C2 tienen un porcentaje de cumplimiento de presión muy bajo, ya que solo aproximadamente un 25% de los ejes direccionales y un 20% de los ejes traseros se encuentran dentro de los límites de presiones recomendadas (Sibaja, 2014).

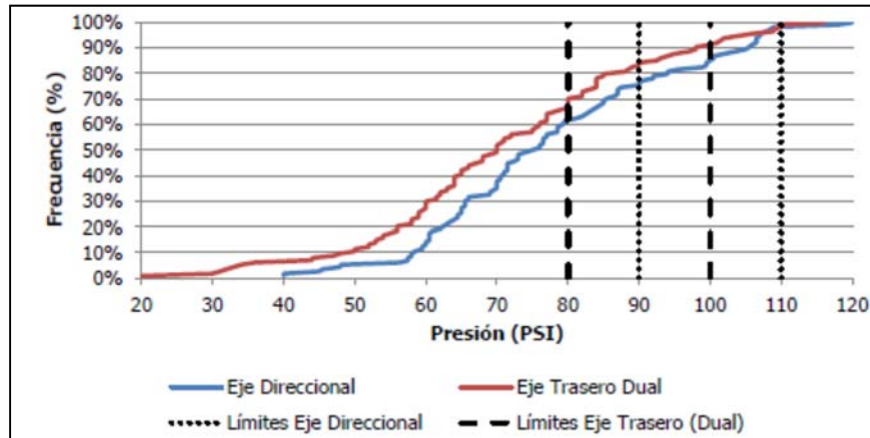


Figura 18. Ochomogo, C2: Función de Distribución Acumulada

Fuente: Sibaja, 2014

Estación de Pesaje de Esparza

En esta estación los vehículos tipo T3-S2 mostraron un comportamiento adecuado, como se observa en la Figura 19 y la Figura 20, ya que los valores máximos de presión y frecuencia se encuentran dentro de los rangos recomendados por el Mopt para cada eje según el peso, para el eje direccional la presión máxima es de entre 95 y 100 psi mientras que para los eje tándem y tándem intermedio su valor máximo está entre los 85 y 90 psi (Sibaja, 2014).

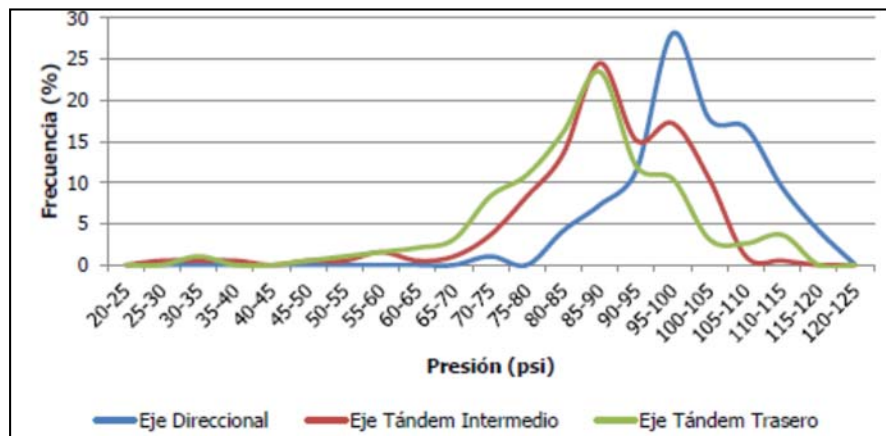


Figura 19. Esparza, T3-S2: Espectro de Presión

Fuente: Sibaja, 2014

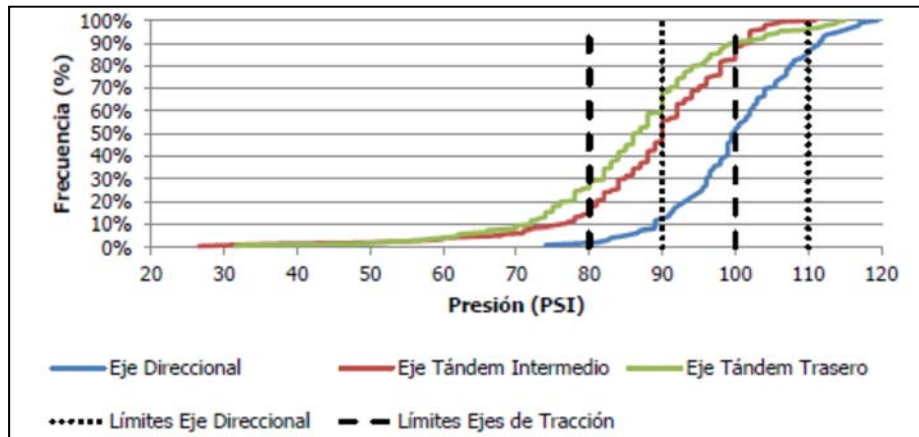


Figura 20. Esparza, T3-S2: Función de Distribución Acumulada

Fuente: Sibaja, 2014

Sibaja (2014) recalca la repetición en el comportamiento variable mostrado por los vehículos tipo C2 a lo largo de la investigación. Como se observa en la Figura 21 donde cada eje presenta un espectro de presión con varios "picos", el eje direccional presente su valor máximo se encuentra entre un rango de presión de 70-75 psi, aunque el eje trasero tiene "picos" con frecuencias muy similares a diferentes presiones, presenta su máximo entre una presión de 90 y 95 psi.

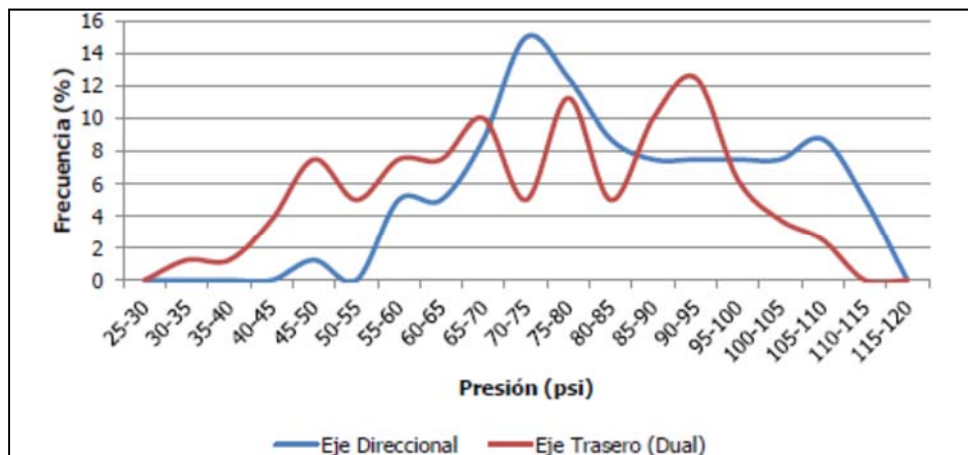


Figura 21. Esparza, C2: Espectro de Presión

Fuente: Sibaja, 2014

En la Figura 22 se evidencia una vez más que la frecuencia acumulada que se encuentra dentro de las bandas recomendadas es muy baja. Este comportamiento se explica por la variabilidad en modelos de camiones tipo C2 (Sibaja, 2014).

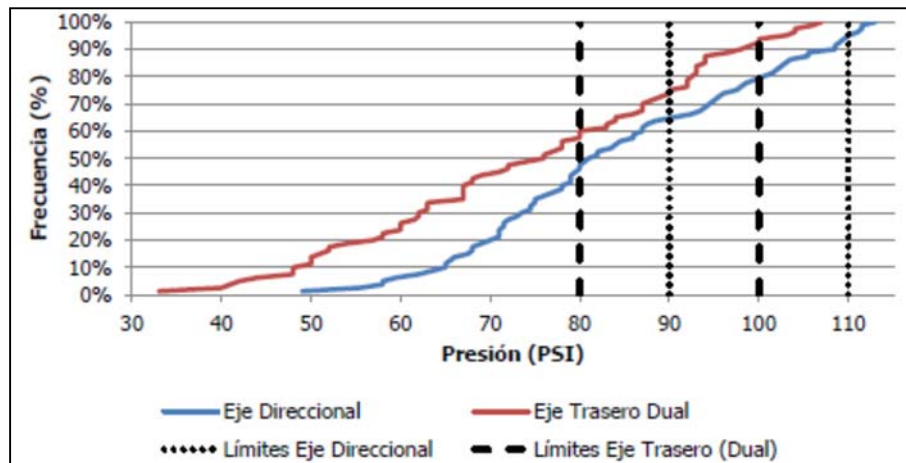


Figura 22. Esparza, C2: Función de Distribución Acumulada

Fuente: Sibaja, 2014

Impacto de las características de los vehículos

Durante la investigación Sibaja (2014) realizó un seguimiento a las características de los vehículos que se consideran las principales causantes del deterioro de las carreteras, algunas conclusiones son las siguientes:

- Porcentaje de carga: al asignar una clasificación según el porcentaje de carga que llevaran al momento de realizar la muestra por tipo de vehículo, siendo descargado para los vehículos C2 si lleva un máximo del 35 % de su peso total permitido (16 toneladas incluyendo su propio peso), para los vehículos tipo T3-S2 si lleva menos del 45 % de su peso total permitido (39 toneladas incluyendo su propio peso) y cargado de presentarse el caso contrario, se obtuvo una notable mayoría de vehículos cargados ya que en ambos casos más del 60 % de los vehículos se encontraban cargados.



- Tipo y marca de neumático: al realizar un conteo del tipo y marca de cada neumático que utilizaron los vehículos durante el muestreo se obtuvieron 77 marcas en total para los vehículos tipo T3-S2, siendo Aeolus la marca más utilizada con más del 27 % del total. Se encontraron 59 marcas en total para los vehículos tipo C2, siendo la más usada Firestone con un 43 % del total (lo cual se debe a que es la marca más utilizada por la empresa Florida Ice & Farm). Además, para ambos tipos de vehículos el tipo de neumático más usado es el 11R22.5, con más del 53 % para los vehículos T3-S2 y más del 40 % para los C2.
- Efecto de la temperatura sobre la presión de inflado: para comprobar si la temperatura posee un efecto directo sobre la presión de inflado de los neumáticos como estipula el análisis bibliográfico se realizó mediciones de las temperaturas y presiones de cada vehículo de la muestra y analizando los coeficientes de correlación de estos para los vehículos tipo T3-S2 y los tipo C2, llegando a la conclusión de que al tener coeficientes de correlación, entre presión y temperatura de los neumáticos, muy bajos la temperatura no tuvo un efecto significativo en la presión de inflado obtenida en la muestra.
- Relación entre carga y presión de inflado: además de estudiar el porcentaje de vehículos cargados, se analizó el efecto de la carga sobre la presión de inflado al tomar las mediciones de la presión en los neumáticos y la carga en cada eje, concluyendo que existe una relación entre ambos parámetros para los vehículos tipo T3-S2 y los tipo C2. Sin embargo, al hacer el análisis estadístico de correlación evidenció que el efecto de un parámetro sobre otro es muy pequeño, llegando inclusive a ser nulo en ocasiones.

Análisis de varianza (ANOVA)

Para determinar si existe una diferencia estadística entre las rutas y datos tomados Sibaja (2014) indica que se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) con una

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 52 de 103
----------------------------	---	------------------

confianza del 95 % con el programa estadístico Minitab para aceptar o rechazar la nula de que los juegos de datos fueran iguales. Para esto en primer lugar se le realizó una prueba de normalidad Anderson-Darling a los datos con lo que se confirmó que los datos poseían un comportamiento normal. Luego al hacer las comparaciones se llegaron a diversas conclusiones:

- Las medidas de presión para los vehículos tipo T3-S2, a excepción de dos ocasiones, son iguales para todos los sitios de estudio, el caso de los vehículos tipo C2 las mediciones de presión tomadas son muy similares entre todos los sitios analizados con excepción de las tomadas en la empresa Florida Ice & Farm.
- El comportamiento entre los meses de estudio y en los sitios muestreados es aleatorio.
- Todas las temperaturas en las llantas entre los sitios de estudio y entre los meses de muestreo fueron distintas.
- Para los ejes direccionales la presión de inflado en los neumáticos iguales sin importar si el vehículo se encuentra cargado o descargado; sin embargo, para los ejes de tráiler tándem o tándem trasero la presión varía al tener el vehículo cargado o descargado.

Conclusiones y recomendaciones

Basándose en el análisis de los datos recopilados Sibaja (2014) llega, entre otras, a las siguientes conclusiones:

- Se deben contar con rangos específicos y actualizados de las presiones de inflado que reflejen el tránsito que se moviliza en la Red Vial Nacional.
- Se debe instaurar un método de muestreo capaz de reducir el sesgo estadístico de los datos.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 53 de 103
----------------------------	---	------------------



- Las presiones en los vehículos tipo T3-S2 se encuentran en su mayoría dentro del rango aceptable de presión de inflado establecido por el Mopt, de no encontrarse dentro del rango la tendencia es que la presión de inflado sea menor a la recomendada.
- Para los vehículos tipo C2 se daba un comportamiento muy variable, por lo que se considera que no es adecuado clasificar este tipo de vehículo en un solo rango de presión de inflado.
- Los vehículos de carga pesada utilizan presiones de inflado entre 55 y 70 psi mayores a los de carga liviana.
- A pesar de que hay un efecto de la temperatura sobre la presión de inflado, este no es determinante sobre el valor de presión obtenido.
- Los rangos de presiones de inflado para los vehículos tipo T3-S2 son similares a los encontrados por estudios análogos internacionales, ya que se también se encontró que en los ejes direccionales las presiones son mayores que en los ejes de tracción de los vehículos; no obstante, en Costa Rica se encontró que la presión de los ejes direccionales es de alrededor de 100 psi, mientras que en algunos estudios llegaban hasta los 120 psi.
- Se deben separar en carga liviana y carga pesada los vehículos tipo C2 no solo en la tarjeta de circulación, sino también el peso máximo permitido.
- Se deben construir más estaciones de pesaje e implementar un sistema de control de pesos más riguroso para regular la carga que transportan los vehículos pesados en la Red Vial Nacional.

Trabajo de graduación: Influencia de la presión de inflado en el desempeño de los pavimentos flexibles

La presión de inflado incide en la distribución de los esfuerzos sobre la carpeta asfáltica, presiones de inflado que excedan lo especificado reducen el área de contacto, por lo tanto los esfuerzos se concentran en un área menor; mientras que

bajas presiones producen un mayor contacto en la parte externa del neumático lo que genera un mayor desgaste de esa zona, como se ilustra en la Figura 23.

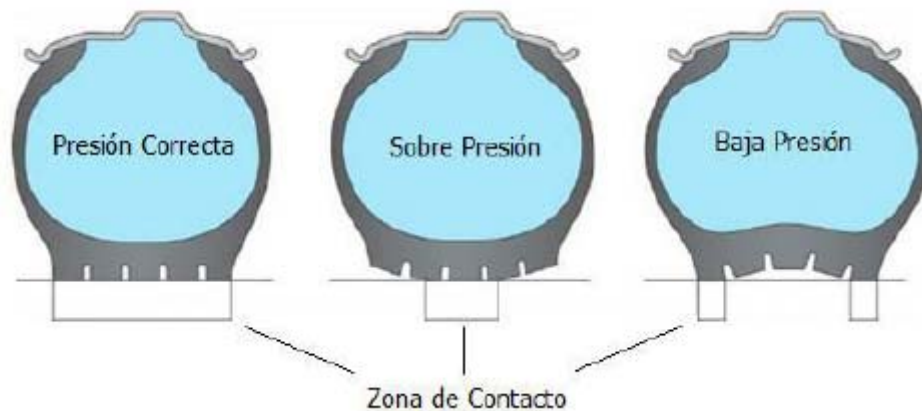


Figura 23. Influencia de la presión de inflado sobre el área de contacto de un neumático

Fuente: Sibaja, 2014

La zona de contacto entre el neumático y la carpeta asfáltica es conocida como la huella de la llanta, esta generalmente posee un área muy similar al área de un elipsoide, como se observa en la Figura 24.



Figura 24. Huella de neumático en un eje de llanta dual

Fuente: Wang, 2011

La modelación se realizó mediante la colocación de sensores de presión sobre la carpeta asfáltica, a través de la cual se obtuvieron representaciones gráficas como la observada en la Figura 25.

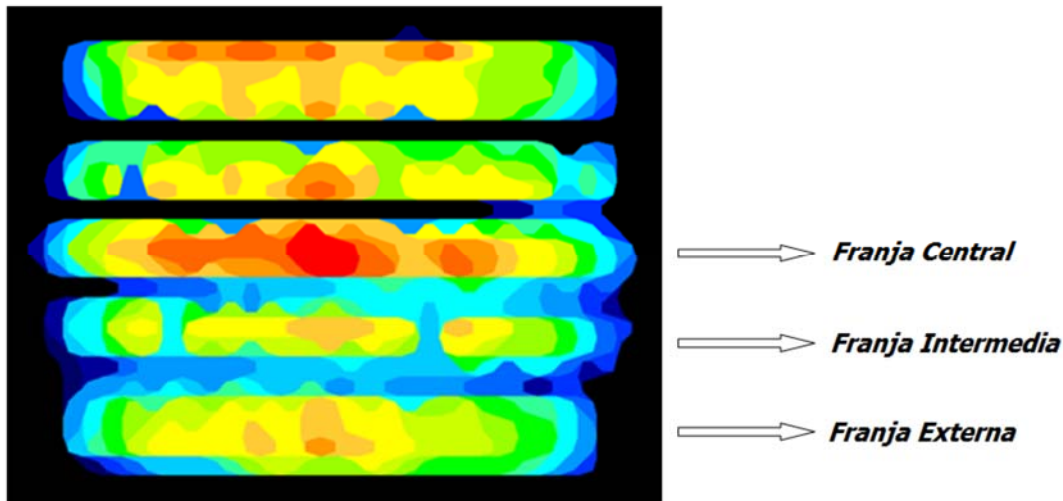


Figura 25. Ilustración de la presión de contacto vertical en la huella generada

Fuente: Clark, 2016

Mediante el estudio, se logró concluir:

- “A gran carga y presión de inflado baja, los esfuerzos de contacto máximos ocurren en las franjas externas del área de carga, mientras que para presiones de inflado altas (cuando el neumático presenta mayor rigidez) y cargas bajas las presiones de contacto máximas se dan en la franja central del área de carga.”
- La presión de contacto en la franja central del área de carga manifiesta una tendencia parabólica que al aumentar la carga se aplanan, hasta valores límites cercanos a la presión de inflado.
- Ocurren subpresiones en las franjas intermedias de la huella de la carga aplicada.

- Se observaron sobrepresiones en las franjas externas de la huella para presiones de inflado bajas y cargas muy altas.
- “La presión de inflado de los neumáticos presenta un efecto muy pequeño sobre la deflexión del pavimento.”
- Se determinó que la deformación crítica en la capa de mezcla asfáltica se da por cortante.
- “La distribución de la presión de contacto en la huella del neumático presenta una clara influencia sobre la ubicación de la deformación unitaria vertical crítico en la capa de mezcla asfáltica”.
- Se demostró que, considerando la forma real de la presión de contacto, en muchos casos se puede también obviar la no linealidad del suelo.

9. Fase 3: Desviación lateral de la llanta

El LanammeUCR colaboró con los proyectos de graduación desarrollados por Velvet Morris Mitchel denominado “*Determinación del desplazamiento lateral de vehículos en carreteras urbanas de Costa Rica*”, y por el estudiante de ingeniería civil Esteban Oconitrillo Varela titulado “*Uso de sensores ultrasónicos en la medición de desplazamiento lateral vehicular en diferentes secciones de la Red Nacional Primaria de Costa Rica*” (Oconitrillo, 2018).

Trabajo de graduación: Determinación del desplazamiento lateral de vehículos en carreteras urbanas de Costa Rica

En el estudio de Morris (2016) se determina “un valor de desplazamiento lateral para las carreteras de Costa Rica. Para esto se realizaron mediciones de la posición de los neumáticos de los vehículos en seis estaciones ubicadas en diferentes rutas nacionales dentro del Gran Área Metropolitana (ruta 2, ruta 3, ruta 202, ruta 32, ruta 39 y ruta 108).

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 57 de 103
----------------------------	---	------------------

Se pintaron líneas a con una distancia específica entre sí y se utilizó una cámara para grabar la ubicación de los vehículos respecto al margen, tanto livianos como pesados. Con estos datos se realizó un análisis probabilístico para determinar la distribución que se ajusta mejor a los datos y se calculó el desplazamiento lateral como la desviación estándar de la ubicación de los vehículos en el carril.”



Figura 26. Fotografía de la ubicación de la cámara en la estación de la Ruta Nacional 32.

Fuente: Morris, 2016

Las conclusiones de este trabajo se muestran a continuación (Morris, 2016):

- "El desplazamiento lateral de vehículos pesados promedio para carreteras del Gran Área Metropolitana de Costa Rica es 29,05 cm. El desplazamiento lateral en 4 de las 6 rutas nacionales se ubica en un rango entre 24 y 35 cm. La incertidumbre de la medición es $\pm 6,25$ cm.
- Entre menor sea el desplazamiento lateral en una carretera mayor es el deterioro producido en el pavimento por agrietamiento tipo piel de cocodrilo, deformación permanente y rugosidad.
- Los valores determinados de desplazamiento lateral y los intervalos de confianza en este informe son mayores al utilizado por el LanammeUCR de 10 cm en los ensayos de simulador de vehículos pesados. Lo cual significa que los daños por agrietamiento y la deformación permanente son mayores en los ensayos del simulador de vehículos pesados que en las carreteras nacionales.
- El desplazamiento lateral no se ve afectado significativamente por el tipo de vehículo ni el tipo de eje, el rango de valores promedio determinados en este informe se encuentra entre 28,11 a 31,56 cm. En este rango no se consideró el eje trídrem por la falta de muestras.
- La ubicación promedio del centro del neumático respecto al margen, tanto para vehículos livianos como para pesados, es de aproximadamente 100 cm (1 m) para los carriles de ancho cercano a 3,6 m. La cual es la posición del neumático cuando el vehículo transita por el centro del carril.
- En la mayoría de los casos, los datos de ubicación en el carril no se ajustan a ninguna de las distribuciones probadas. Sin embargo, en algunas ocasiones como la Ruta Nacional 202 los datos siguen la distribución normal" (p. 103-104).

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 59 de 103
----------------------------	---	------------------

Trabajo de graduación: Uso de sensores ultrasónicos en la medición de desplazamiento lateral vehicular

Este proyecto consiste en valorar un método de medir la desviación lateral de los vehículos con un sensor ultrasónico controlado por un dispositivo de software libre (micro-controlador ArduinoUNO).

Se midió en varias rutas nacionales la distancia desde el margen de la vía de diversos tipos de vehículos. Con estos datos se obtuvo el desplazamiento lateral y la frecuencia acumulada de cada vía, que posteriormente se comparó con los resultados obtenidos por el estudio de referencia mencionado.

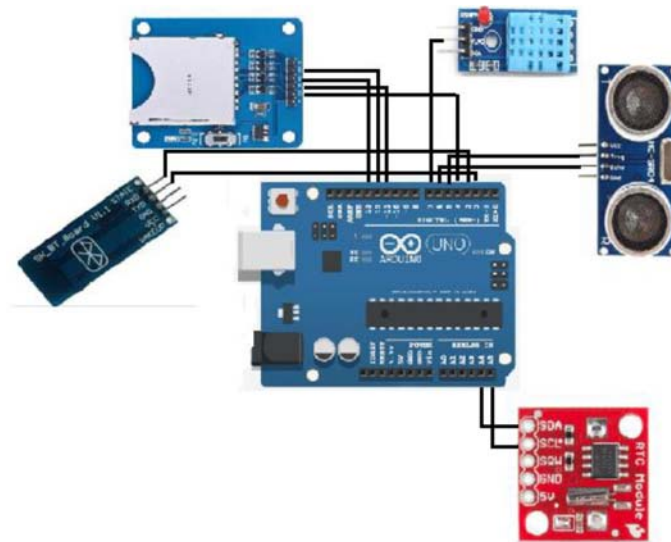


Figura 27. Esquema de las conexiones de todos los módulos y sensores a la tarjeta ArduinoUNO

Fuente: Oconitrillo, 2018

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 60 de 103
----------------------------	---	------------------

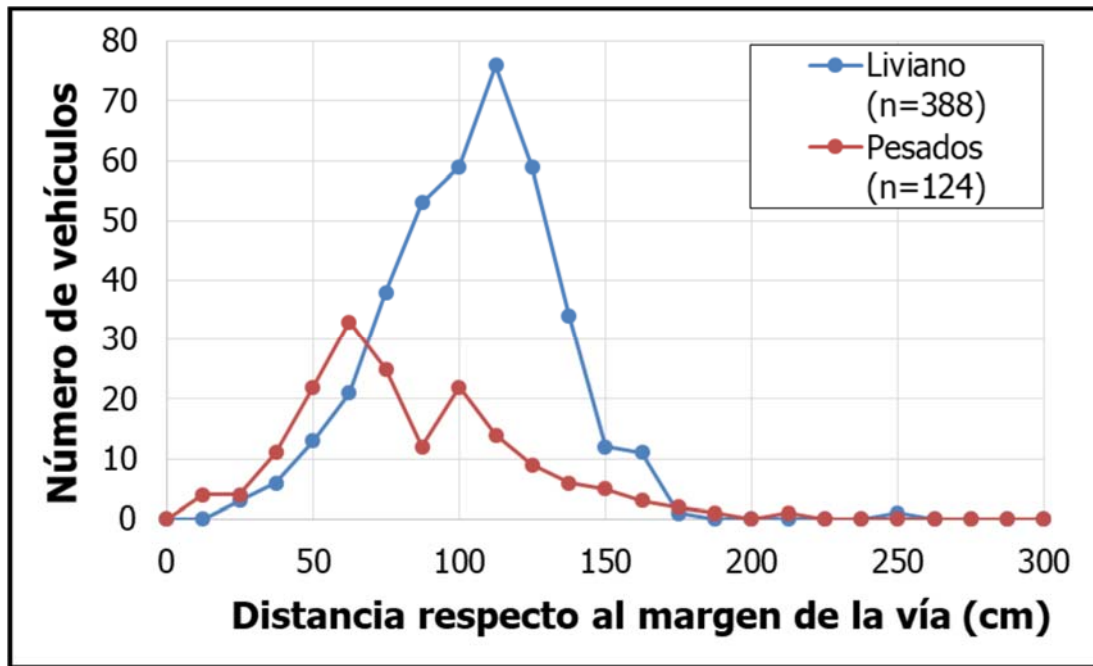


Figura 28. Tendencia de los vehículos a transitar a una distancia particular respecto al margen de la vía en la Ruta Nacional 2 ($n_{livianos} = 388$, $n_{pesados} = 124$)

Fuente: Oconitrillo, 2018

En este estudio se concluyó lo siguiente:

- En las Rutas Nacionales 2, 3, 32 y 108 la distancia respecto al margen de la vía se registraron datos inferiores a los 200 centímetros.
- En la mayoría de las vías estudiadas, el 50 % de los datos se encuentra entre los 50 y 100 centímetros medidos desde el margen de la vía.
- Los vehículos livianos son los que presentan menor distancia desde el margen de la vía en comparación con los vehículos pesados.



10. Fase 4: parámetros y estadísticos de clasificación vehicular

Trabajo de graduación: Determinación de patrones típicos de distribución temporal

Magaña (2014) realizó el proyecto de graduación titulado “*Determinación de patrones típicos de distribución temporal de tránsito en Costa Rica*” para obtener el grado de licenciatura en ingeniería civil de la Universidad de Costa Rica. A partir del análisis estadístico de datos obtenidos de estaciones de conteo permanentes, se determinaron los patrones temporales, conociendo los días de la semana con patrones típicos de distribución horaria del tráfico, así como los meses con patrones típicos de distribución del tráfico por día de la semana para cada estación estudiada.

La investigación se centró en el análisis de los datos públicos de tránsito vehicular de las estaciones permanentes de conteo, de la Unidad de Gestión de Carreteras de la Dirección de Planificación Sectorial y el Centro de Control de Tránsito de la Dirección General de Ingeniería de Tránsito del MOPT, en los días con datos para las 24 horas del año 2012, se utilizaron además los datos del Consejo Nacional de Concesiones, por medio de la Sociedad Concesionaria de la Ruta Nacional 27, Carretera San José – Caldera, así como los obtenidos en aforos temporales de tránsito realizados por el PITRA-LanammeUCR para validar los patrones obtenidos.

Según Magaña (2014) es necesario conocer como varían los volúmenes de tránsito a lo largo de los días, semanas y meses para la adecuada programación de los aforos vehiculares y relacionar los volúmenes de un tiempo y lugar específicos con otro volumen de otro tiempo y lugar.

La Administración Federal de Carreteras (FHWA por sus siglas en inglés) (2013) indica que los conteos vehiculares resultan el dato de entrada más importante para los análisis relacionados con la ingeniería de tránsito, por lo que deben caracterizarse los volúmenes de tránsito según: el tránsito promedio diario anual

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 62 de 103
----------------------------	---	------------------

(TPDA), el tránsito promedio diario, el máximo de vehículos que pasan por una carretera en 60 minutos (volúmenes de hora pico) y el volumen de tránsito según el tipo de vehículo (clasificación vehicular), para asegurar una adecuada interpretación de los datos analizados.

Factores de Tránsito

En la Figura 29 se ilustra el comportamiento para el total de vehículos en la estación PK+7100 en ella Ruta Nacional 27 obtenido mediante el análisis de conglomerados de grupos. Magaña (2014) aclara que para este caso se tomó como patrón horario el obtenido de lunes a jueves al ser el más repetitivo en la estación, este mismo proceso se realizó en cada una de las estaciones permanentes de conteo y para cada clasificación vehicular, para obtener el vector de comportamiento típico de estas.

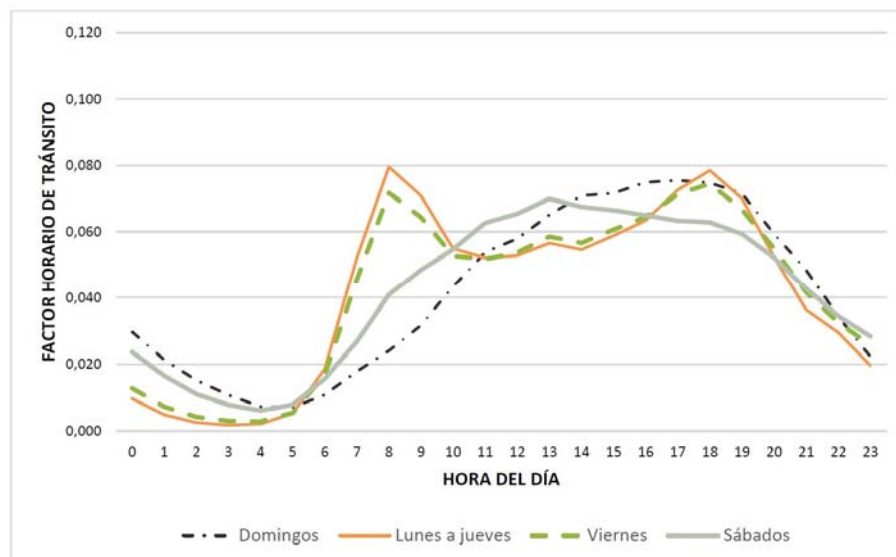


Figura 29. Patrones horarios del total de vehículos, estación PK+7100.

Fuente: Magaña, 2014



Determinación de días de la semana y meses con patrones típicos

Para agrupar los datos es necesario definir grupo con patrones de variación temporal de tránsito que posean comportamientos similares, para luego determinar el comportamiento medio del grupo que servirá de referencia del comportamiento de los caminos del mismo grupo (Federal Highway Administration (FHWA), 2013). Para realizar el agrupamiento en este estudio se utilizó un análisis de conglomerados desarrollado por Ward (1963), el cual es un procedimiento estadístico estándar en el que se utiliza un algoritmo de agrupamiento jerárquico para identificar objetos similares (Regehr, 2011). A partir de los grupos obtenidos se desarrollaron diagramas de decisión para la asignación de sitios de conteo de corta duración, dentro de los grupos de factores determinados, para cada tipo de vehículo. Los datos se segmentaron en cinco grupos, cuatro según el tipo de vehículo y el quinto grupo para la suma de todos los vehículos.

Magaña (2014) asigna la siguiente abreviatura a cada grupo.

- Tipo 1 (T1). Vehículos livianos y de carga liviana
- Tipo 2 (T2). Autobuses
- Tipo 3 (T3). Camiones unitarios: Vehículos de carga de una sola unidad.
- Tipo 4 (T4). Camiones con remolque: Incluirá los vehículos de carga de uno o más remolques con 5 ejes o más.
- Sumatoria para todo tipo de vehículo (SUM). Incluye vehículos Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3 y Tipo 4.

Históricamente, la Dirección de Planificación Sectorial del Mopt utiliza contadores neumáticos en sus estaciones de conteo permanente, las cuales se localizan a lo largo de todo el país como se muestra en la Figura 30. Recientemente, se han incorporado nuevas estaciones permanentes con tecnología tipo radar.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 64 de 103
----------------------------	---	------------------



Nombre	Abreviatura	Ruta No.	Ubicación
Búfalo	BUF	32	500 m antes de la estación de pesaje de Búfalo
Cambronero	CMB	1	**Poblado de Angostura
Cañas	CAN	1	San Miguel de Cañas, inmediaciones del puente sobre el Río Higuerón
Desmonte	DES	3	500 m después del poblado de Desmonte, San Mateo
Juan Viñas (Turrialba)	JVI	10	5.5 km antes de la ciudad de Turrialba
Liberia	LIB	21	4.9 km al Oeste de Liberia, frente a Economy Rent a Car
Matapalo - Guápil	MAT	34	*Al frente de la entrada a playa Guápil.
Muelle	MUE	4	Muelle de San Carlos, 3 Km Este del cruce con la Ruta N°35
Paso Canoas	PCA	2	Inmediaciones del mojón del Kilómetro 349, cantón de Corredores
Río Chiquito	RCH	6	Puente sobre el Río Tenorio, cantón de Bagaces.
San Juanillo (Naranjo)	SJU	141	San Juanillo de Naranjo, 6 Km al Norte de Naranjo, Alajuela
Tempisque	TEM	18	Cerca de INTACO, 3.5 km antes del puente sobre el Río Tempisque, Abangares

*Nota: Esta estación entró a sustituir a la de Matapalo. Entró a operar a partir del 03 agosto 2012. Debido a la ubicación geográfica de esta nueva estación respecto a la anterior, se considera que no varían en sus características del tránsito entre sí.

**Nota: Esta estación se varió su ubicación 2 km más abajo de su ubicación anterior. Antes estaba localizada cerca de Piedras Blancas.

Figura 30. Estaciones de conteo permanentes, al año 2013, de la Dirección de Planificación Sectorial del Mopt.

Fuente: Magaña, 2014

Magaña (2014) utilizó datos brindados por la Unidad de Seguridad Vial y Transporte del PITRA-LanammeUCR, la cual emplea contadores neumáticos de manguera en los cerca de 35 aforos vehiculares de al menos una semana de duración realizados en 14 rutas nacionales pavimentadas a lo largo del país. Magaña (2014) indica además que utilizó los datos de tránsito recopilados en las estaciones de conteo permanentes instaladas en la Ruta Nacional 27 por la Sociedad Concesionaria de la Ruta Nacional 27, Carretera San José - Caldera, adscrita al Consejo Nacional de Concesiones, para un periodo de tiempo que va desde junio del 2009 a enero del 2013, y que fueron facilitados por el Departamento de Medios de Transporte del

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 65 de 103
----------------------------	---	------------------

MOPT, para realizar el conteo de vehículos en estas estaciones se utilizan detectores de espiras magnéticas (bucles de inducción). En la Figura 31 se muestra el resumen de las ubicaciones de conteo permanentes instaladas en esta ruta.

Estación	Ubicación
PK 0+500	Costado Sur del Parque Metropolitano La Sabana
PK 2+900	Inmediaciones de intersección Pavas - Anonos
PK 7+100	Inmediaciones de intersección hacia Multiplaza Escazú
PK 10+500	1 km antes de intersección a Santa Ana
PK 22+450	Radial El Coyol
PK 30+620	Puente de Río Grande
PK 31+550	Radial Atenas - 500m antes del Peaje
PK 41+960	550m antes del cruce a Escobal de Atenas
PK 54+950	1,5km después de intersección con Ruta Nacional 3
PK 62+180	1 km después de Intersección con Ruta 34
PK 71+335	Antes del puente del río Jesús María
PK 75+400	Entre Central de Contenedores Caldera y Almacén Fiscal ANFIPAL S.A.

Figura 31. Ubicación de estaciones de conteo permanente en la Ruta Nacional 27.

Fuente: Magaña, 2014

Como se explicó con anterioridad, antes de realizar el análisis de conglomerados, se determinaron los patrones temporales típicos, tanto para los días de la semana con patrones típicos de distribución horaria del tráfico para cada estación y para cada tipo de vehículo, para esta última clasificación se obtuvo que la tendencia en el total de vehículos y para los vehículos livianos (Tipo 1) es de martes a jueves, para los autobuses (Tipo 2) y los vehículos pesados (Tipo 3 y Tipo 4) son los días de lunes a viernes, y luego se utilizaron las curvas de factores horarios de los días de la semana con patrones típicos para obtener los patrones típicos de los aforos hechos por el PITRA-LanammeUCR, con los que obtuvieron, para 57 puntos de aforo, las series típicas por hora del día para cada clasificación vehicular (Magaña, 2014).

Se efectuó el mismo procedimiento para determinar los meses con patrones típicos de distribución del tráfico por día de la semana, se encontraron los meses con patrones de distribución atípicos para cada estación y según el tipo de vehículo. En las estaciones de conteo permanente, los meses con patrones atípicos que más se repitieron fueron: enero, abril y diciembre, lo cual coincide con los periodos festivos. Luego se realizó el análisis de conglomerados para cada sitio de conteo y tipo de vehículo, a partir de los vectores de patrones típicos, para determinar las variaciones temporales de tránsito, tal como se resume a continuación:

Variaciones temporales de tránsito por hora del día y día de la semana

Para el análisis, Magaña (2014) explica que contaron con 42 puntos de aforo de los cuales 12 son estaciones del Consejo Nacional de Concesiones (CNC), 11 son estaciones permanentes a cargo de la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT y 19 corresponden a aforos temporales realizador por el PITRA-LanammeUCR, a los cuales les realizó el análisis de conglomerados obteniendo los resultados y conclusiones según el tipo de vehículo que se resumen a continuación.

I. Sumatoria de todo tipo de vehículos (SUM)

Variaciones de distribución horaria del tráfico: del análisis de conglomerados se obtuvieron cuatro grupos:

- Grupo 1 (SUM-H1): Se constituye de estaciones en zonas alejadas de la Gran Área Metropolitana, en especial de la zona norte: Presentan un rápido crecimiento de las 4:00 a.m. a las 7:00 a.m., alcanzando un 6 % del tránsito diario que se mantiene hasta las 12:00 m.d. y luego creciendo hasta alcanzar un 7 % del tránsito diario hasta las 4:00 p.m.
- Grupo 2 (SUM-H2): Compuesto por estaciones permanentes de la Ruta Nacional 27, Carretera San José-Caldera. Se presentaron dos picos de



tránsito a las 8:00 a.m. y a las 6:00 p.m. con valores cerca del 8 % del tránsito diario.

- Grupo 3 (SUM-H3): Conformado por estaciones ubicadas en las zonas rurales de la Ruta Nacional 27, este grupo presenta un comportamiento similar al del Grupo 1 pero con periodos de crecimiento a horas distintas.
- Grupo 4 (SUM-H4): Engloba las estaciones de la Carretera Bernardo Soto, la Carretera Interamericana Sur, La Carretera Cartago-Turrialba y la intercesión entre la Ruta Nacional 32 y la Ruta Nacional 4. Se mostraron dos picos de volumen vehicular a aproximadamente las 6:00 a.m. y a las 4:00 p.m.

Variaciones del tráfico por día de la semana

- Grupo 1 (SUM-S1): Compuesto por 17 estaciones distribuidas principalmente en la zona norte del país en la Ruta Nacional 1 y la Ruta Nacional 32 entre otras. Se presentó un volumen poco variable entre semanas llegando a un máximo el día viernes con un 14 % más de volumen del TPD mensual y un menor volumen los fines de semana.
- Grupo 2 (SUM-S2): Se conforma de las estaciones permanentes de la Ruta Nacional 27 más cercanas a la zona rural de la capital y la estación de la Radial el Coyol. Se presentaron volúmenes más bajos los fines de semana y entre semana los valores van aumentando a partir del día lunes hasta alcanzar a su máximo el día viernes con un tránsito diario 15 % mayor al TPD.
- Grupo 3 (SUM-S3): Conformado por estaciones de la Ruta 27 desde Atenas hasta la Carretera Costanera en la Ruta 34. Dado a que se encuentra cerca de las rutas de acceso a playas y zonas turísticas los fines de semana se da un aumento de volumen vehicular ya que suelen ser utilizados por vacacionistas.

- Grupo 4 (SUM-S4): Está compuesto por zonas rurales de uso mixto, ya que también san acceso a zonas turísticas como Puerto Caldera y Puntarenas entre otras, lo que explica un aumento de volumen los fines de semana.

II. Vehículos livianos y de carga liviana o Tipo 1 (T1)

Ya que este tipo de vehículo compone la mayor parte de la flota vehicular del país el comportamiento que presenta es muy similar al presentado por la sumatoria de todos los tipos de vehículos.

Variaciones de distribución horaria del tráfico:

- Grupo 1 (T1-H1): Integra principalmente por sitios de la costa pacífica y la zona de Guanacaste y de dos sitios de aforo en la costa atlántica. Presenta una variación horaria de rápido crecimiento entre las 3.00 a.m. y las 6 a.m. que luego desacelera hasta las 4 p.m. donde se da un periodo de volumen máximo.
- Grupo 2 (T1-H2): Se compone de estaciones ubicadas en el área urbana de la Ruta Nacional 27 y dos sitios de aforo en las radiales de Atenas y el Coyol. Este grupo presenta dos horas pico muy marcadas, con un crecimiento más tardío durante el día, teniendo el máximo volumen de la tarde a las 6:00 p.m.
- Grupo 3 (T1-H3): Aglomera las estaciones de las zonas más rurales de la Ruta Nacional 27. Presenta su mayor volumen cerca de las 5:00 p.m. con cerca del 7 % del volumen diario.
- Grupo 4 (T1-H4): Se conforma de las zonas semi-rurales como los sectores de la Ruta Nacional 1 entre los accesos a Grecia y Palmares y las zonas cercanas a la GAM. Se da un comportamiento de dos picos de magnitud menor a la del Grupo 3.
- Grupo 5 (T1-H5): Compuesto por estaciones ubicadas en la zona norte del país como Upala, San Carlos y Sarapiquí, y estaciones permanentes de Naranjo y Liberia. Se da un crecimiento a partir de las 4:00 a.m. hasta

alcanzar un pico durante la mañana de 6 % del tránsito diario y un máximo del 8 % del tránsito diario a las 5:00 p.m. de la tarde.

Variaciones del tráfico por día de la semana:

- Grupo 1 (T1-S1): Está constituido por las estaciones de San Carlos, de la Carretera Bernardo Soto y la estación permanente de Búfalo. Se da un comportamiento uniforme entre semana con valores cercanos al TPD de la ruta con los valores máximos los viernes.
- Grupo 2 (T1-S2): Se compone de estaciones ubicadas en zonas urbanas de la Ruta Nacional 27 y la Radial de Coyol, así como la estación permanente de Liberia. Se da un volumen bajo en los fines de semana comparación al resto de los días.
- Grupo 3 (T1-S3): Aglomera estaciones localizadas en rutas de paso a una de las regiones más turísticas del país como lo es Jacó de Puntarenas y sus alrededores, por lo que se da un aumento considerable del volumen vehicular a partir del viernes y hasta el domingo, con valores de hasta 1,4 veces el TPD.
- Grupo 4 (T1-S4): Conformado por gran parte de las estaciones de la zona del Pacífico Central ceca de la playa Dominical, las estaciones de la Ruta Nacional 10 y las estaciones Tempisque y Cañas, además de la estación permanente de Paso Canoas. Se da un ligero aumento del volumen vehicular los fines de semana, lo que refleja zonas con características turísticas.

III. Autobuses o Tipo 2 (T2)

Variaciones de distribución horaria del tráfico: Este tipo de vehículos presentan patrones por hora del día más variables entre ellos, ya que según Magaña (2014), en ciertas regiones hay un volumen reducido de autobuses y pocas rutas, porque se presta el servicio en horas específicas del día.

- Grupo 1 (T2-H1): Este grupo presenta una distribución geográfica muy diversa, entre las zonas que aglomera se encuentran el Muelle de San

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 70 de 103
----------------------------	---	------------------



Carlos, Sarapiquí, Liberia, Puntarenas centro entre otras. Se da un crecimiento del volumen de autobuses a partir de las 3:00 a.m. y un pico alrededor de las 6:00 am con un 7,7 % del tránsito diario de autobuses, que disminuye cerca de las 4:00 p.m.

- Grupo 2 (T2-H2): Integra a las estaciones permanentes de la Ruta Nacional 27 en el que se da un crecimiento acelerado de autobuses desde la 5:00 a.m. a las 8:00 a.m. hasta que llega a un 6,5 % del tránsito diario, presenta su máximo volumen vehicular entre la 2:00 p.m. y las 6:00 p.m. aproximadamente.
- Grupo 3 (T2-H3): Compuesto por estaciones de la zona rural de la Ruta Nacional 27, la zona del Pacífico Central, la zona de Cañas y las cercanías del río Tempisque. Se da un crecimiento lento del volumen vehicular en la mañana hasta las 8:00 a.m. luego se da un comportamiento constante hasta las 5:00 p.m. donde comienza a decrecer muy lentamente.
- Grupo 4 (T2-H4): Se conforma de estaciones en la cercanía de Vuelta Kooper y Aguas Zarcas de San Carlos, y en la zona de las Rutas Nacionales 2 y 34 entre Dominical y Río Claro, así como algunas estaciones aisladas de la red vial. El grupo muestra un periodo pico entre las 5:00 a.m. y las 6:00. a.m. a partir del cual comienza a disminuir, mientras que en la tarde se da otro crecimiento hasta alcanzar un valor de 9 % del tránsito diario de autobuses en la tarde.

Variaciones del tráfico por día de la semana: Se presentaron solamente dos conglomerados al haber menos variaciones respecto a los días de la semana.

- Grupo 1 (T2-S1): Este conglomerado concentra la mayoría de las estaciones al tener 26 de 40 de los sitios de aforo analizados en una región geográfica muy amplia. Se presentó un patrón menor en los fines de semana con valores del 50 % del TPD de los autobuses y un 90 % del TPD los sábados, mientras



que entre semana los valores rondan los 110 % con el máximo el viernes al alcanzar un 120 % del TPD de autobuses.

- Grupo 2 (T2-S2): Se constituye de estaciones específicas en el sector rural de la Ruta Nacional 27 entre Atenas y Puerto Caldera, la mayor parte de las estaciones del Pacífico central y sur en la Carretera Costanera, la estación permanente de Paso Canoas en la Ruta Nacional 2 entre otros. Este grupo presenta un volumen bajo los domingos y lunes, que incrementa hasta el viernes cuando alcanza su máximo valor de 116 % de TPD de la ruta por lo que se supone una influencia turística en las rutas.

IV. Camiones unitarios o Tipo 3 (T3)

Variaciones de distribución horaria del tráfico:

- Grupo 1 (T3-H1): Las estaciones que lo componen se encuentran en áreas rurales del país, en su mayoría de la zona norte, atlántica de Costa Rica y de la Carretera Interamericana. Se observó un patrón de rápido crecimiento a partir de las 3:00 p.m., a las 6:00 a.m. se presenta un comportamiento constante con un 6 % a 7 % del volumen de tránsito diario de camiones unitarios hasta las 5:00 p.m.
- Grupo 2 (T3-H2): Engloba estaciones de la zona urbana de la Ruta Nacional 27. Se presentó un comportamiento de dos picos muy definidos en mañana y en la tarde, siendo el primero mayor con un 8,5% del tránsito diario en comparación al 7,5 % de la tarde.
- Grupo 3 (T3-H3): Concentra las estaciones de los sectores rurales de la Ruta Nacional 27 y las ubicadas en la radial de El Coyol. En este grupo se presenta un crecimiento en el volumen de vehículos a las 3:00 a.m. y las 6:00 a.m. hasta alcanzar un pico a las 8:00 a.m. y 10:00 a.m., a partir de esa hora comienza a darse un nuevo crecimiento hasta alcanzar el volumen máximo



del día entre las 3:00 p.m. y las 5:00 p.m., con aproximadamente 6,5 % del volumen de camiones unitarios diarios

- Grupo 4 (T3-H4): Integra las estaciones cercanas a la zona pacífica de Costa Rica en la Carretera Costanera y Guanacaste, las localizadas en la Ruta Nacional 1 y la Ruta Nacional 10 así como las de la Ruta Nacional 32 entre el cruce de Sarapiquí y la entrada a Siquirres. En este grupo se presentó un patrón de crecimiento vehicular temprano con casi un 6 % del tránsito diario de los camiones unitarios en horas de la mañana para luego decrecer hasta reflejar un crecimiento de un 6,6 % del volumen diario de las 3:00 p.m. a las 4:00 p.m.

Variaciones del tráfico por día de la semana:

- Grupo 1 (T3-S1): Se conforma principalmente de estaciones localizadas en la región norte del país y las ubicadas tanto en la zona rural y urbana de la Ruta Nacional 32 y la Ruta Nacional 1 en la Carretera Bernardo Soto. Se observaron valores mayores al TPD para los días entre semana llegando al máximo el viernes donde se obtuvo un 123 % del tránsito promedio diario, mientras que para los sábados y domingos se presentó un volumen mucho menor con cerca del 48 % del TPD.
- Grupo 2 (T3-S2): Se compone de las estaciones ubicadas en la región Caribe del país, las estaciones sobre la Carretera Interamericana Norte, la zona de Guanacaste y la estación permanente de Paso Canoas. El comportamiento muestra un bajo volumen de tránsito el domingo, mientras que el sábado se da un volumen de tránsito poco menor al del día viernes, por otro lado, entre semana se da aproximadamente 110 % del TPD.

V. **Camiones con remolque o Tipo 4 (T4)**

Variaciones de distribución horaria del tráfico:

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 73 de 103
----------------------------	---	------------------



- Grupo 1 (T4-H1): Se conforma en su mayoría de zonas rurales, a lo largo de la Carretera Costanera en la Ruta Nacional 34, las cercanías de Paso Canoas en la Ruta Nacional 2, la zona norte y la región de Cañas y Abangares. Este grupo muestra un crecimiento desde las primeras horas del día hasta las 7:00 a.m. donde alcanza un porcentaje de volumen diario cercano al 5 % que se mantiene constante hasta el mediodía, donde presenta un crecimiento que lo lleva a alcanzar un 6 % del volumen diario y finalmente comienza a decrecer al ser las 5:00 p.m.
- Grupo 2 (T4-H2): Las estaciones de las que se compone este grupo se ubican en centros urbanos, tanto de la Ruta Nacional 27, de Ciudad Quesada, Liberia, Golfito, San Isidro del General, Puntarenas y Atenas. Se observan patrones típicos con dos picos importantes en la mañana cerca de las 8:00 a.m. y en la tarde al aproximarse a las 6:00 p.m. con un 7,5 % del tránsito diario de los vehículos Tipo 4.
- Grupo 3 (T4-H3): Agrupa estaciones de la Ruta Nacional 32, específicamente de la estación de conteo permanente de Búfalo y del aforo temporal realizado en El Cairo de Siquirres, de la Ruta Nacional 27 entre Atenas y Puerto Caldera, y de la Carretera Costanera en la Ruta 34. Presenta valores horarios menores a 4 % antes de las 9:00 a.m. que aumenta hasta alcanzar su máximo a las 12:00 p.m. con un volumen de 6 % del tránsito promedio para los camiones con remolque.
- Grupo 4 (T4-H4): Lo componen los sitios de aforo de la Ruta Nacional 10 entre Cartago y Siquirres. Este grupo presenta un pico de volumen de tránsito diario para vehículos Tipo 4 considerablemente más alto que en el resto del día entre las 6:00 a.m. y 8:00 a.m. alcanzando un 9 %, que se reduce rápidamente hasta alcanzar un 4 % a las 10:00 a.m., luego alcanza un 6 % que se mantiene hasta las 6:00 p.m. para decrecer abruptamente una vez más.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 74 de 103
----------------------------	---	------------------



- Grupo 5 (T4-H5): Las estaciones de conteo que se agrupan en este grupo se ubican en las Ruta Nacional 1 cerca de las Carretera Bernardo Soto, en la Ruta Nacional 2 en el sector de Casa Mata de la Carretera Interamericana. El grupo presenta un periodo pico de volumen vehicular cerca de las 5:00 a.m., luego presenta una disminución desde las 6:00 a.m. a las 9:00 a.m. y otra en la tarde, entre las 3:00 p.m. y las 7:00 p.m. Estas disminuciones se pueden deber a las restricciones vehiculares implementadas en mayo del 2013 mediante el *Reglamento para la ordenación horaria de la circulación de vehículos pesados*, establecido mediante el Decreto Ejecutivo N° 37727-MOPT del 17 de mayo de 2013.

Variaciones del tráfico por día de la semana:

- Grupo 1 (T4-S1): Se compone de todas las estaciones de conteo con excepción de los localizados en la Carretera Costanera en la Ruta Nacional 34 y en la estación permanente de Paso Canoas. El grupo mostró valores bajos los fines de semana, teniendo el domingo un 50 % del TPD para camiones con remolque. El volumen de vehículos máximos se dio el día viernes con un 117 % del TPD para este tipo de vehículos, aunque cabe destacar que el día miércoles se da un volumen importante con un 116 % del TPD.
- Grupo 2 (T4-S2): El grupo se conforma por estaciones localizadas en el Pacífico Central y en el Pacífico Sur, específicamente en la Carretera Costanera de la Ruta Nacional 34 y en la Carretera Interamericana Sur (Ruta Nacional 2). Se presentó un volumen de tránsito bajo el día lunes, llegando incluso a ser menor que para el día domingo; sin embargo, el resto de los días se dan volúmenes cercanos al del TPD de cada ruta.



Variaciones de tránsito por mes del año

Magaña (2014) realiza el análisis de variación por mes del año para los grupos determinados por el análisis de conglomerados, estudiando únicamente para estaciones permanentes, como las de la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT y las estaciones permanentes de la Ruta Nacional 27. Los resultados y conclusiones que obtuvo se resumen a continuación.

I. Sumatoria de todo tipo de vehículo (SUM)

- Grupo 1 (SUM-M1): Se conforma en su gran mayoría de estaciones rurales (a excepción de la estación fija PK+2900 sobre la Ruta Nacional 27), tales como las estaciones de Guanacaste, las ubicadas en las zonas rurales de la Ruta Nacional 26 y las estaciones de la zona norte (Muelle y Río Chiquito), y la estación Matapalo en la Carretera Costanera. El grupo mostró un TPD diferencialmente mayor en los meses de enero, abril, julio y diciembre; los cuales coinciden con los periodos de vacaciones de fin de año, semana santa y medio periodo; en los cuales se alcanzaron valores de TPD de hasta 20 % mayores.
- Grupo 2 (SUM-M2): Se compone de estaciones ubicadas en el sector urbano de la Ruta Nacional 27 y en estaciones semi-urbanas, como las estaciones de Búfalo, Juan Viñas y San Juanillo. Este grupo no presenta grandes variaciones a lo largo del año, sino únicamente en el mes de diciembre con un 5 % más de TPD y una reducción en abril que coincide con las vacaciones de Semana Santa.

II. Vehículos livianos y de carga liviana o Tipo 1 (T1)

- Grupo 1 (T1-M1): Conformado por estaciones de aforo de sectores rurales. Se evidencia nuevamente que las estaciones se ven afectadas por los periodos vacacionales mostrando el máximo tránsito promedio en los meses de diciembre y enero.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 76 de 103
----------------------------	---	------------------



- Grupo 2 (T1-M2): Se compone de las estaciones Búfalo, Juan Viñas y San Juanillo, además de las estaciones urbanas en la Ruta Nacional 27. Se presentó un comportamiento similar al del Grupo 2 de la suma de todos los vehículos, con volúmenes vehiculares por mes del año estables y variando únicamente en los meses de abril y diciembre.

III. Autobuses o Tipo 2 (T2)

- Grupo 1 (T2-M1): Se conforma por las estaciones ubicadas en las afueras del área metropolitana (a excepción de las estaciones de Cañas, Juan Viñas y Río Chiquito). Las estaciones presentan un patrón de tránsito con volúmenes vehiculares de autobuses más altos en los meses de enero y febrero (120 % TPD), el cual se reduce hasta el mes de junio, en julio incrementa levemente para decrecer de nuevo en agosto y finalmente mantenerse en 90 % del TPD hasta los meses de noviembre y diciembre llegando a cerca del 100 % del TPD.
- Grupo 2 (T2-M2): Integra las estaciones ubicadas en la región urbana de la Ruta Nacional 27 y las estaciones de Cañas, Río Chiquito y Juan Viñas. Se presentó un patrón de tránsito constante y cercano al 100 % del TPD; sin embargo, se presentan dos puntos de volumen elevado en el mes de marzo (105 % TPD) y noviembre (110 % del TPD), mientras que en abril y agosto de da un ligero descenso en el TPD siendo en el mes de abril hasta 10 % menor.

IV. Camiones unitarios o Tipo 3 (T3)

- Grupo 1 (T3-M1): Se compone por estaciones fuera de la GAM, excluyendo la estación fija de Matapalo. El grupo presentó un volumen de más del 5 % del TPD en el primer trimestre del año, que se reduce hasta un 95 % del TPD entre los meses de junio y octubre, desde los cuales comienza a crecer

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 77 de 103
----------------------------	---	------------------



llegando a su máximo en el mes de diciembre con cerca de un 11 % más que el TPD.

- Grupo 1 (T3-M2): El grupo aglomera las estaciones urbanas de la Ruta Nacional 27, la Radial Atenas y la estación fija de Matapalo, en la Carretera Costanera. Se mostró un volumen muy cercano al TPD en los primeros meses del año, luego presenta una reducción durante los meses de abril y mayo, para regresar a un tránsito promedio cercano al TPD por el resto del año, excluyendo al mes de noviembre que presenta el volumen máximo de camiones unitarios con cerca del 108 % del TPD.

V. Grupo 2 (T3-M2): Camiones con remolque o Tipo 4 (T4)

- Grupo 1 (T4-M1): Se conforma básicamente por sitios de aforo ubicados afuera de la GAM, presenta un tránsito promedio mensual muy similar al TPD, el cual comienza a decrecer a partir del mes de marzo hasta alcanzar su punto menor en el mes de junio con 90 % del TPD. El valor máximo se da en el mes de diciembre con 107,5 % del TPD.
- Grupo 2 (T4-M2): El grupo está formado exclusivamente por estaciones ubicadas en la autopista Próspero Fernández en la Ruta 27 (estaciones ubicadas en los estacionamientos PK+ 500, Pk+7100 y Pk+10500). El grupo presenta valores cercanos al TPDA en los primeros tres meses del año, mostrando una pequeña disminución en los meses de abril y mayo, alcanza sus valores mayores de tránsito en los meses de noviembre y diciembre, con un 110 % y 103 % del TPDA respectivamente.

Asignación de segmentos a grupos de patrones de tránsito

Magaña (2014) explica que para asignar una sección de carretera específica al estudio de cada grupo de factores de tránsito, ya sea por hora del día, día de la semana o mes del año, se realizaron tablas de resultados con los factores de tránsito para cada clasificación de vehículos, además de diagramas de decisión

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 78 de 103
----------------------------	---	------------------

para asignar los grupos a cada clasificación. Esto con el objetivo de analizar el comportamiento de los aforos temporales en ese tramo a partir de los patrones de tránsito temporales.

El procedimiento empleado por Magaña (2014) para la obtención de los factores de tránsito en un tramo particular, se inicia determinando la aplicación de los factores conforme a los meses y días típicos explicados con anterioridad, buscando que el aforo sea de preferencia en una vía de dos sentidos de circulación, luego se utilizan los diagramas de decisión para determinar los patrones de cada tipo de vehículo (sumatoria de todo tipo de vehículos, vehículos livianos y de carga liviana, autobuses, camiones unitarios o camiones articulados) de acuerdo a las características geográficas y funcionales que posean. Luego a partir de los grupos de factores obtenidos se realiza la expansión de volúmenes para calcular los volúmenes por hora del día, día de la semana y mes del año.

El la Figura 32 se muestra un ejemplo del cuadro de decisión para la suma de vehículos por hora del día, mientras que en la Figura 33 se muestra a modo de ejemplo la tabla de factores según mes del año de acuerdo a los grupos obtenidos para la suma de todos los vehículos.



Figura 32. Ejemplo de cuadro de decisión

Magaña, 2014



SUMATORIA DE TODO TIPO DE VEHÍCULO (SUM)	MES DEL AÑO	GRUPOS DE FACTORES	
		M1	M2
	ENERO	1,122	0,990
	FEBRERO	1,029	1,004
	MARZO	1,008	1,029
	ABRIL	1,063	0,952
	MAYO	0,927	0,967
	JUNIO	0,912	0,979
	JULIO	1,063	1,003
	AGOSTO	0,927	1,003
	SETIEMBRE	0,907	0,994
	OCTUBRE	0,929	0,999
	NOVIEMBRE	0,974	0,988
	DICIEMBRE	1,179	1,042

Figura 33. Ejemplo de tabla de factores según mes del año

Magaña, 2014

Validación de factores de tránsito

Finalmente para comprobar la exactitud de los factores de tránsito encontrados, y determinar la validez de estos, Magaña (2014) explica que para los factores horarios se realizaron comparaciones a partir de conteos de corta duración para zonas específicas, con el objetivo de comparar los patrones horarios reales del sitio con los encontrados para cada zona, por medio de los diagramas de decisión; mientras que para los factores semanales y mensuales, se realizó la comparación de los grupos encontrados por medio de un análisis híbrido (en donde se considera el análisis estadístico, el conocimiento obtenido mediante la recopilación bibliográfica de la red vial y de patrones de viaje, y el criterio ingenieril) con los factores promedio de los mismos grupos de estaciones de conteo encontrados a partir del TPD por día de la semana suministrados por la Dirección de Planificación Sectorial de MOPT para distintos meses.



Conclusiones y recomendaciones

Luego del análisis de los resultados obtenidos en la investigación, Magaña (2014) llega a diversas conclusiones, entre las que se destacan las siguientes:

- A partir de un análisis combinado por medio de herramientas estadísticas y la caracterización de cada sitio de aforo, fue posible la determinación de los patrones típicos de variación temporal del tránsito en cinco clasificaciones, estos patrones aumentan la precisión de la estadística de tránsito, lo que podría reducir los gastos económicos e inducir a una mejora de los diseños de estructuras viales y pavimentos.
- El análisis de conglomerados probó ser una herramienta apta para clasificar los datos de tránsito en grupos con comportamientos vehiculares similares. Se puede expandir su aplicación al tránsito costarricense al combinar el análisis de conglomerados con el criterio ingenieril y el conocimiento de las redes viales del país.
- Los volúmenes de tránsito vehicular en las carreteras de Costa Rica presentan variaciones repetitivas para periodos determinados de tiempo, por lo que es posible establecer patrones de comportamiento vehicular típicos.
- Los días martes, miércoles y jueves suelen presentar variaciones típicas en su tránsito vehicular para un día normal entre semana, tanto en el volumen total de la vía como para el caso de los vehículos livianos, mientras que los autobuses y vehículos de carga muestran un comportamiento similar desde el día lunes hasta el viernes.
- Para el caso de los vehículos pesados se presenta una variación de tránsito por día de la semana distinta a la de los vehículos livianos, ya que los primeros suelen presentar volúmenes vehiculares menores los días sábados y domingos que entre semana.



- Hay existencia reducida de estaciones de conteo permanentes en el país, que además tienen una distribución geográfica limitada.
- Es necesario realizar una determinación de estadísticas de tránsito precisas para la toma de decisiones en cuanto a la planificación y gestión de la infraestructura vehicular.
- Es recomendable que la administración destine un mayor porcentaje de recursos al análisis de los datos de tránsito recopilados.

Informe de Patrones de Velocidad

Se remitió el informe LM-PI-USVT-002-16 *“Análisis descriptivo de patrones de velocidad a partir de datos de estaciones permanentes de monitoreo de tránsito de Costa Rica”* (Hernández-Vega, Morales-Aguilar, Jiménez-Romero, Leiva-Villacorta, & y Loria-Salazar, 2016).

El informe presenta los resultados de velocidades correspondientes a datos obtenidos de 13 estaciones permanentes de conteo de la Dirección de Planificación Sectorial del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). Estas estaciones están instaladas en diferentes puntos de la Red Vial Nacional. Se analizó la distribución de velocidades para cada estación y se comparó con la velocidad suministrada en los inventarios viales del MOPT, según las secciones de control donde se encuentra cada estación. Se utilizaron datos de velocidades de mínimo una semana para cada estación (con excepción de la estación de Matapalo, en la que se utilizaron datos de seis días) por lo que se obtuvo el comportamiento temporal por las clasificaciones de día de la semana y hora del día.

Se resumen los principales resultados obtenidos a partir de los datos en las diferentes estaciones.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 83 de 103
----------------------------	---	------------------



Resultados según número de ejes:

- Los vehículos de dos ejes poseen las mayores velocidades promedio (Cuadro 1) para todas las estaciones con excepción de la estación de Cañas.
- La velocidad promedio mayor es para los vehículos de dos ejes en la estación de Guápil (85,44 km/h) y la velocidad promedio menor para los vehículos de cinco o más ejes en la estación de Paso Canoas (30,88 km/h).
- En la mayoría de las estaciones (seis estaciones) los vehículos de cinco o más ejes son quienes poseen las menores velocidades promedio, seguido por los de cuatro ejes (cinco estaciones) y por último los de tres ejes (dos estaciones).
- En términos generales, la disminución de la velocidad promedio de acuerdo a los números de ejes es clara para todas las estaciones. Es decir, es de esperar que a mayor número de ejes menor velocidad promedio.
- Las velocidades promedio mayores pertenecientes a los vehículos de dos de ejes superan la velocidad tomada como referencia en todas las estaciones con excepción de Búfalo, Liberia y Paso Canoas.
- Para los vehículos de dos ejes, los vehículos pick up (F3) son quienes poseen las velocidades promedio mayores para la mayoría de las estaciones (seis estaciones), siguiéndoles las motocicletas (F1, cuatro estaciones), luego los autobuses (F4, dos estaciones) y únicamente para la estación de Muelle, los automóviles (F2) poseen las velocidades mayores (Ver Cuadro 10).
- Las velocidades menores promedio varían entre las motocicletas y los camiones de dos ejes en todas las estaciones: de las 13 estaciones analizadas, seis poseen los camiones de dos ejes como vehículos con velocidades promedio menores (F5) y las restantes a las motocicletas (F1). Las velocidades promedio mayores de los vehículos de dos ejes son mayores a la velocidad de referencia para todas las estaciones con excepción de las estaciones de Búfalo, Liberia y Paso Canoas.



Cuadro 9. Resumen de vehículos con velocidad promedio mayor y menor según el número de ejes para cada estación analizada

Estación	Velocidad de referencia (km/h)	Tipo de vehículo con mayor velocidad promedio		Tipo de vehículo con menor velocidad promedio	
		Tipo vehículo	Velocidad Promedio (km/h)	Tipo vehículo	Velocidad Promedio (km/h)
Búfalo	80	dos ejes	73,2	5 o más ejes	67,7
Cambroner o	50	dos ejes	63,5	cuatro ejes	54,8
Cañas	75	tres ejes	81,4	cuatro ejes	73,1
Desmonte	45	dos ejes	53,1	tres ejes	50,2
Guápil	30	dos ejes	85,4	cuatro ejes	76,2
Juan Viñas	50	dos ejes	51,6	5 o más ejes	42,1
Liberia	80	dos ejes	73,3	5 o más ejes	67,0
Matapalo	30	dos ejes	73,8	5 o más ejes	61,0
Muelle	70	dos ejes	72,8	tres ejes	66,4
Paso Canoas	75	dos ejes	54,6	5 o más ejes	30,9
Río Chiquito	60	dos ejes	72,1	cuatro ejes	54,0
San Juanillo	45	dos ejes	59,6	cuatro ejes	51,1
Tempisque	80	dos ejes	84,6	5 o más ejes	73,1

Fuente: Hernández-Vega, Morales-Aguilar, Jiménez-Romero, Leiva-Villacorta, y Loria-Salazar (2016)

- De acuerdo las velocidades según las clasificaciones de los vehículos de dos ejes, los pick up (F3) en la estación de Guápil poseen la velocidad promedio mayor (87,6 km/h). Por otro lado, los camiones de dos ejes (F5) en la estación de Juan Viñas la velocidad promedio mayor poseen la velocidad promedio menor (53,3 km/h).



Cuadro 10. Resumen de vehículos de dos ejes con velocidad promedio mayor y menor según el esquema F de clasificación de FHWA para cada estación analizada

Estación	Velocidad de referencia (km/h)	Tipo de vehículo con mayor velocidad promedio		Tipo de vehículo con menor velocidad promedio	
		Tipo vehículo	Velocidad Promedio (km/h)	Tipo vehículo	Velocidad Promedio (km/h)
Búfalo	80	F3	75,5	F5	67,8
Cambronero	50	F3	66,2	F1	56,6
Cañas	75	F3	79,8	F1	66,7
Desmonte	45	F1	60,2	F5	46,7
Guápil	30	F3	87,6	F1	75,1
Juan Viñas	50	F1	53,3	F5	44,4
Liberia	80	F4	75,3	F1	70,1
Matapalo	30	F3	78,8	F1	58,0
Muelle	70	F2	73,5	F5	66,6
Paso Canoas	75	F3	57,3	F1	50,2
Río Chiquito	60	F1	74,2	F5	66,4
San Juanillo	45	F1	61,7	F5	54,2
Tempisque	80	F4	85,3	F1	75,4

Fuente: Hernández-Vega, Morales-Aguilar, Jiménez-Romero, Leiva-Villacorta, y Loria-Salazar (2016)

Resultados según número de ejes:

- Generalmente, el día de mayor velocidad promedio en las estaciones estudiadas es el domingo (seis estaciones) seguido por el sábado (tres estaciones), luego viernes (dos estaciones) y lunes y jueves con una estación cada uno. Puede concluirse que los fines de semana se presentan velocidades promedio mayores que en el resto de la semana en las estaciones.
- No se presenta ningún patrón con respecto al día con menor velocidad promedio en las estaciones. El viernes es el día más repetitivo (cinco estaciones) y puede retribuirse al final de la semana y aumento en la



disponibilidad para recreación de los usuarios; por lo tanto, aumento de la congestión.

- La velocidad promedio para los días con velocidades promedio mayores y menores supera la velocidad tomada como referencia en todas las estaciones con excepción de Búfalo, Liberia y Paso Canoas (Cuadro 11).

Cuadro 11. Día de mayor y menor velocidad promedio para cada estación en estudio

Estación	Velocidad de referencia (km/h)	Día de mayor velocidad		Día de menor velocidad	
		Día	Velocidad Promedio (km/h)	Día	Velocidad Promedio (km/h)
Búfalo	80	Domingo	73,9	Martes	68,3
Cambronero	50	Domingo	62,5	Viernes	61,3
Cañas	75	Domingo	78,8	Viernes	76,1
Desmonte	45	Viernes	53,8	Domingo	52,8
Guápil	30	Lunes	85,8	Domingo	83,2
Juan Viñas	45	Sábado	52,1	Lunes	48,5
Liberia	80	Domingo	75,5	Viernes	71,9
Matapalo	30	Jueves	74,5	Viernes	65,5
Muelle	70	Domingo	74,9	Jueves	70,3
Paso Canoas	75	Viernes	61,3	Miércoles	43,7
Río Chiquito	60	Sábado	72,4	Viernes	70,4
San Juanillo	45	Sábado	52,6	Domingo y miércoles	50,8
Tempisque	80	Domingo	86,2	Miércoles	81,5

Fuente: Hernández-Vega, Morales-Aguilar, Jiménez-Romero, Leiva-Villacorta, y Loria-Salazar (2016)

- Para la mayoría de las estaciones (nueve de trece estaciones) las horas de velocidad promedio mayor corresponden a la madrugada.
- Las estaciones de Guápil y Matapalo tienen como horas de mayor velocidad las de la mañana (7:00 - 8:00 y 8:00 - 9:00 respectivamente).
- La estación Río Chiquito representa un cambio en el comportamiento de las demás, debido que la hora de mayores velocidades es de cinco a seis de la tarde.



- La mayoría de las estaciones tienen como hora de velocidad promedio menor la tarde, generalmente en el momento de finalización de la jornada laboral (entre cinco de la tarde y siete de la noche).
- Otras estaciones poseen como hora de menor velocidades horas de la madrugada o mañana (Desmonte, Río Chiquito, San Juanillo y Tempisque); sin embargo, esto son casos aparte al comportamiento mayoritario de las estaciones analizadas.
- La velocidad promedio para la hora de mayor velocidad supera la velocidad tomada como referencia para todas las estaciones con excepción de las estaciones de Búfalo y Paso Canoas.

Cuadro 12. Hora de mayor y menor velocidad promedio para cada estación en estudio

Estación	Velocidad de referencia (km/h)	Hora de mayor velocidad		Hora de menor velocidad	
		Hora	Velocidad Promedio (km/h)	Hora	Velocidad Promedio (km/h)
Búfalo	80	1:00 - 2:00	79,2	19:00 - 20:00	62,7
Cambronero	50	5:00 - 6:00	66,6	17:00 - 18:00	57,9
Cañas	75	4:00 - 5:00	84,3	18:00 - 19:00	72,7
Desmonte	45	1:00 - 2:00	56,2	2:00 - 3:00	50,5
Guápil	30	7:00 - 8:00	89,1	18:00 - 19:00	78,2
Juan Viñas	45	22:00 - 23:00	52,5	18:00 - 19:00	47,0
Liberia	80	2:00 - 3:00	83,9	17:00 - 18:00	67,2
Matapalo	30	8:00 - 9:00	78,4	16:00 - 17:00	65,9
Muelle	70	0:00 - 1:00 y 6:00 - 7:00	75,0	18:00 - 19:00	66,4
Paso Canoas	75	0:00 - 1:00	66,1	18:00 - 19:00	47,1
Río Chiquito	60	17:00 - 18:00	73,3	2:00 - 3:00	67,4
San Juanillo	45	2:00 - 3:00	57,5	0:00 - 1:00	48,3
Tempisque	80	4:00 - 5:00	88,8	10:00 - 11:00	79,3

Fuente: Hernández-Vega, Morales-Aguilar, Jiménez-Romero, Leiva-Villacorta, y Loria-Salazar (2016)

- De acuerdo al día de la semana se ven diferentes comportamientos de acuerdo a la estación.

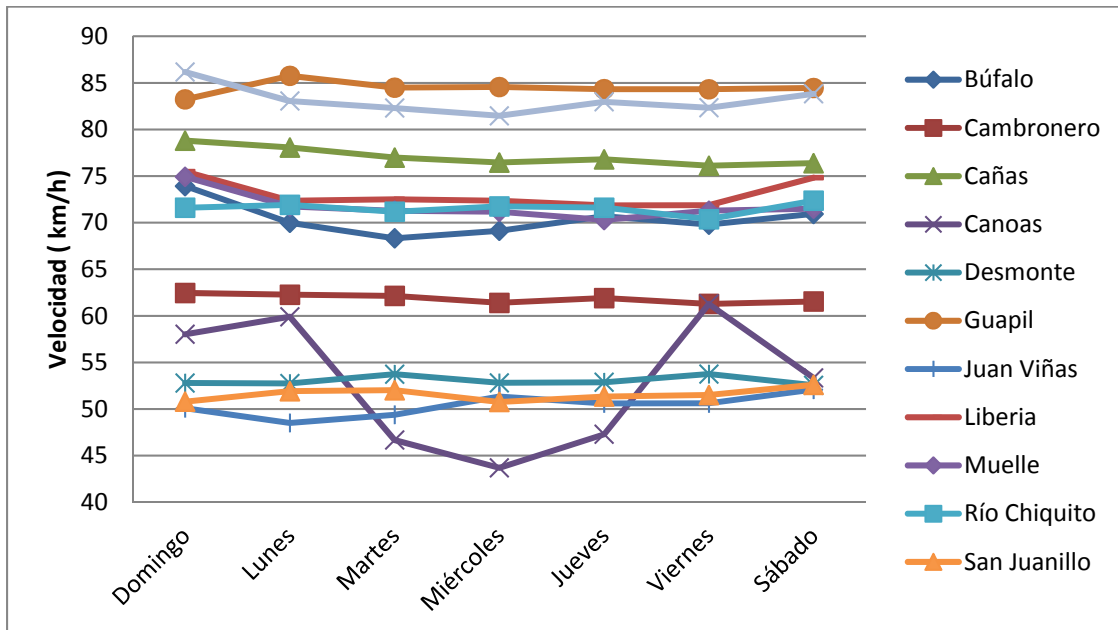


Figura 34. Distribución de velocidades promedio por día de la semana en las estaciones analizadas

Fuente: Hernández-Vega, Morales-Aguilar, Jiménez-Romero, Leiva-Villacorta, y Loria-Salazar (2016)

- Cinco estaciones presentan una distribución de velocidades promedio en la cual el día domingo tiene las mayores velocidades. En algunos casos, el sábado también presenta velocidades promedio mayores a los días entre semana (ver Figura 35).
- Las estaciones de Cambronero, Desmonte, Guápil, Río Chiquito, Juan Viñas y San Juanillo presentan patrones de velocidades que no presentan mayores velocidades promedio los días domingo (Figura 36).
- La estación de Canoas presenta grandes variaciones en sus velocidades promedio.

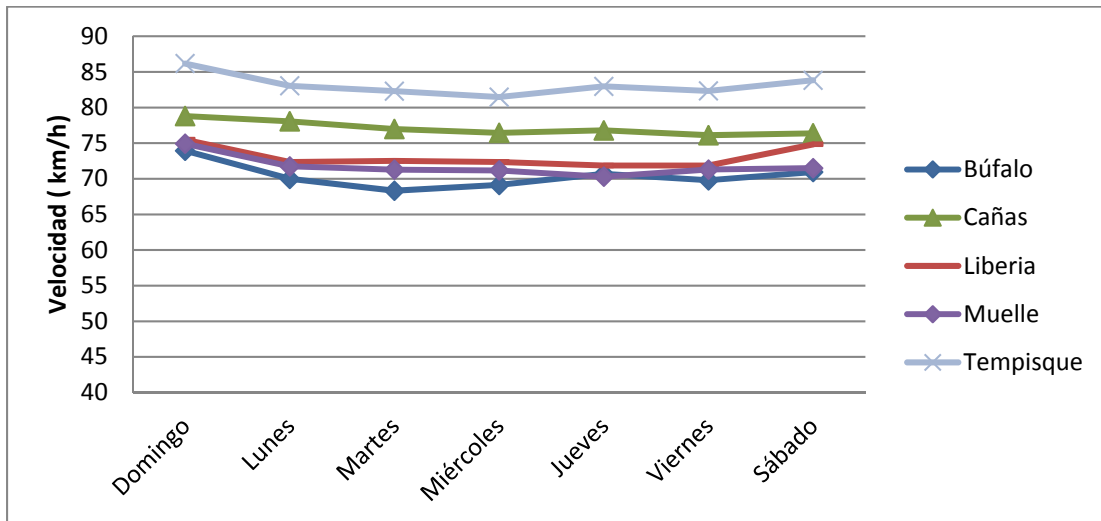


Figura 35. Distribución de velocidades promedio por día de la semana para estaciones con velocidades promedio más alta los días domingo

Fuente: Hernández-Vega, Morales-Aguilar, Jiménez-Romero, Leiva-Villacorta, y Loria-Salazar (2016)

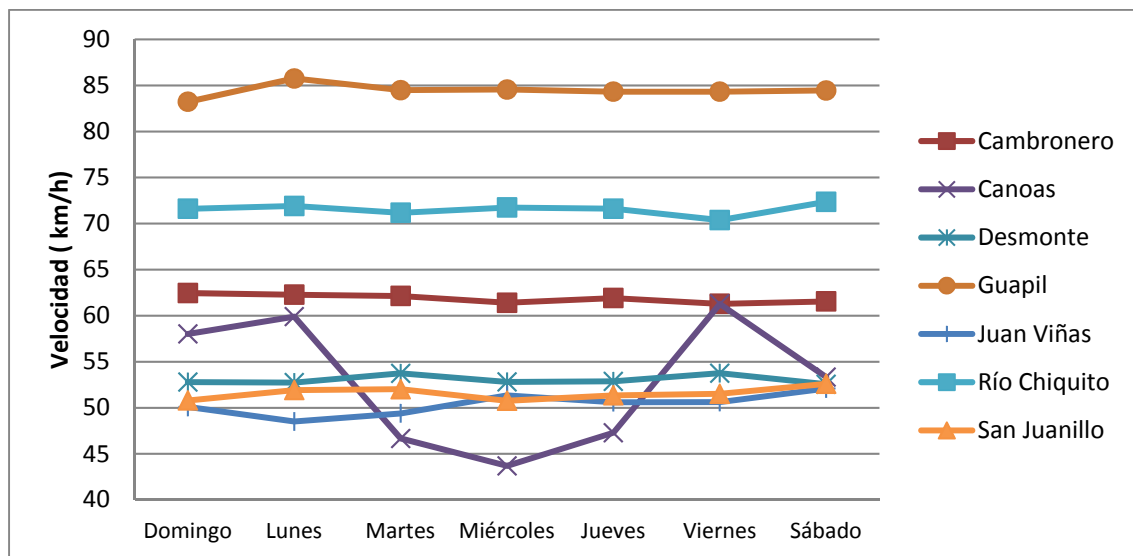


Figura 36. Distribución de velocidades promedio por día de la semana para estaciones donde el domingo no presenta mayores velocidades

Fuente: Hernández-Vega, Morales-Aguilar, Jiménez-Romero, Leiva-Villacorta, y Loria-Salazar (2016)

- La mayoría de las estaciones presentan una distribución de velocidades por hora del día similar. Las estaciones similares presentan altas velocidades en



horas de la madrugada. En algunos casos presenta un pico de velocidad entre las seis y siete de la mañana, y a partir de esta hora comienza a disminuir la velocidad promedio hasta llegar a un punto de inflexión al medio día, posteriormente aumenta de nuevo hasta llegar a un nuevo punto de inflexión entre las cinco de la tarde y ocho de la noche para luego comenzar a aumentar nuevamente.

- Las estaciones de Canoas y Matapalo presentan patrones de velocidades por semana diferentes a las demás estaciones.

Además, el informe presenta las siguientes recomendaciones.

- Verificar en campo la velocidad tomada como referencia en cada estación para de esta manera determinar el porcentaje de vehículos que superan la velocidad máxima permitida y la velocidad temeraria (20 km/h mayor que la máxima permitida).
- En futuros estudios se podría incluir una descripción del tramo de calle como ancho de calzada, si hay o no espaldones, pendiente, entre otros que lleve a una clasificación por niveles de servicio (LOS) y una correlación con los datos obtenidos.
- Se podría realizar análisis estadísticos que reafirmen el incumplimiento o no de la velocidad límite.
- Es recomendable la aplicación de análisis de varianza para comparar resultados entre tratamientos, tipo de vehículo, velocidad de referencia (baja, media y alta), entre otros.
- Utilizar análisis estadístico en futuros estudios para confirmar el día de mayor y menor velocidad.
- Realizar futuras investigaciones con el fin de evaluar la incidencia de factores ambientales en las estaciones durante los días de medición, para comparar

el comportamiento de los usuarios en los diferentes escenarios posibles en Costa Rica (lluvia, neblina, sol, noche, día).

- Separar los datos por sentido para futuras investigaciones, con el fin de comparar el flujo de velocidades en cada sentido en dependencia de la hora del día.
- Continuar realizando mediciones en las estaciones para obtener la evolución del comportamiento de los usuarios a través del tiempo y determinar la causa de algún posible cambio en el mismo.

11. Trabajos finales de graduación

En resumen, los siguientes seis trabajos finales de graduación se encontraron asociados con el proyecto de investigación.

- Arrieta, J. (2017). Espectros de carga asociados a distintos tipos de vehículos pesados en rutas de la red vial estratégica nacional no reguladas por estaciones de pesaje.
- Clark, D. (2016). Análisis de la influencia de la presión de inflado sobre las respuestas críticas en el desempeño de los pavimentos flexibles.
- Mata, N. (2018). Externalidades ambientales, en seguridad vial y en infraestructura del transporte de carga ferroviaria en la zona atlántica costarricense.
- Morris, V. (2016). Determinación del desplazamiento lateral de vehículos en carreteras urbanas de Costa Rica. San Pedro, Montes de Oca
- Oconitrillo, E. (2018). Uso de sensores ultrasónicos en la medición de desplazamiento lateral vehicular en diferentes secciones de la Red Vial Nacional Primaria de Costa Rica.
- Rodríguez, L. (2018). Desarrollo de espectros de carga para la red vial cantonal.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 92 de 103
----------------------------	---	------------------

Además, los siguientes tres trabajos finales de graduación previos a la fecha de inscripción del proyecto se encuentran directamente relacionados con este proyecto:

- Espinoza, J. C. (2013). Trabajo Final de Graduación: Determinación de factores camión y espectros de carga representativos de autobuses urbanos e interurbanos para diseño de pavimentos flexibles en carreteras de Costa Rica
- Magaña, J. (2014). Determinación de patrones típicos de distribución temporal de tránsito en Costa Rica.
- Sibaja, L. (2014). Determinación de presión de neumáticos de vehículos de carga típicos de Costa Rica. San José.

12. Divulgación

Los resultados de la investigación de las distribuciones temporales del flujo vehicular, tanto para vehículos livianos y como pesados se presentaron en el Congreso Norteamericano de Monitoreo del Tráfico (NATMEC, por sus siglas en inglés) que es organizado por la Junta de Investigación del Transporte de los Estados Unidos de América. El congreso se llevó a cabo en el mes de mayo de 2016 en la ciudad de Miami, Florida.

La presentación se llevó a cabo durante la sesión de Análisis de datos de camiones de carga y durante la presentación se explicó acerca de la importancia de los datos de tráfico y del limitado conocimiento que existía en el país relacionada con el poco conocimiento de las variaciones temporales del tráfico. Se explicó el análisis de conglomerados utilizado para la generación de los grupos de patrones típicos para los diferentes tipos de vehículos. Se reportaron diferencias significativas en las

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 93 de 103
----------------------------	---	------------------

variaciones temporales del tráfico en zonas urbanas respecto con las variaciones que se presentan en las zonas rurales. Además, se identificó un periodo valle entre las dos horas pico para el flujo de camiones articulados. Finalmente, se indicó que es necesaria una mejora del sistema de recopilación de la información en el país.

Adicionalmente, los resultados presentados en el primer avance del proyecto de investigación se presentaron en el Congreso de Ingeniería Civil (Hernández-Vega, Vargas-Sobrado, Aguiar-Moya, Jiménez-Romero, & Loría-Salazar, 2016) durante el mes de setiembre de 2016. El artículo presentado resume los avances logrados en los temas de encuesta de carga, presión de inflado, desviación lateral de llanta, tránsito vehicular y patrones de velocidad.

Los resultados del trabajo final de graduación de la estudiante Velvet Morris Mitchell (Morris, 2016) titulado “Determinación del desplazamiento lateral de vehículos en carreteras urbanas de Costa Rica” fueron publicados en la edición de diciembre del 2016 de la Revista Infraestructura Vial/LanammeUCR bajo el título “Determinación del desplazamiento lateral de vehículos en carreteras urbanas de Costa Rica” (Leiva & Morris, 2016). En dicha publicación, se encuentra en cuadro resumen que se muestra a continuación:

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 94 de 103
----------------------------	---	------------------



Cuadro 13. Valores de desplazamiento lateral por tipo de vehículo para las rutas muestreadas

Estaciones	Desplazamiento lateral (cm)				
	Livianos	Pesados			Todos
		Doble	Tándem	Trídem	
Ruta Nacional 3 (Heredia)	25,30	31,11	31,92	42,14	31,36
Ruta Nacional 2 (Cartago)	26,82	27,71	28,90	7,22	27,56
Ruta Nacional 202 (Sabanilla)	42,87	33,75	50,93	0	36,48
Ruta Nacional 32 (Guápiles)	25,01	31,13	25,17	17,37	26,58
Ruta Nacional 39 (Zapote)	20,16	28,26	30,02	12,50	27,79
Ruta Nacional 108 (La Uruca)	28,47	25,59	22,43	19,24	24,53
Promedio	28,11	29,59	31,56	19,69	29,05

Elaborado por Leiva & Morris, 2016

Además, los resultados del trabajo final de graduación de Daniel Clark Araya titulado “Análisis de la influencia de la presión de inflado en el desempeño de los pavimentos flexibles se presentaron en Qatar, el 17 de abril de 2018 en el AM3P (*Advances in Materials and Pavement Performance Prediction*) en una exposición titulada “*Analysis of the Tire Pressure Effect on Flexible Pavement’s Responses by Means of FEM and APT Instrumentation*” (Clark, Leiva, Loría, & Aguiar, 2018). Dentro de los resultados expuestos en dicha conferencia se tiene lo observado en siguientes figuras donde se observa el efecto que tiene la presión de inflado en la distribución de esfuerzos sobre la carpeta asfáltica.

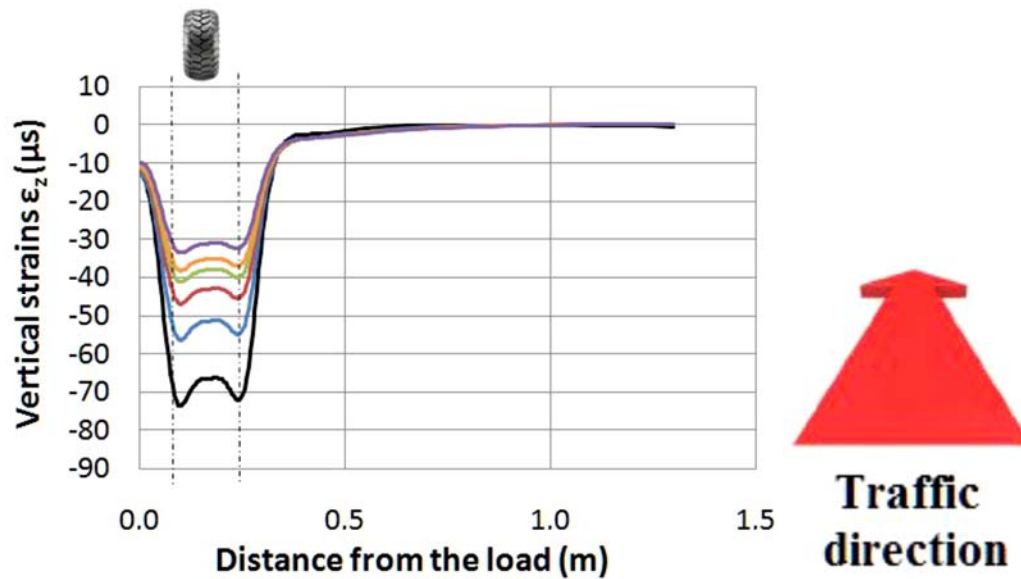


Figura 37. Deformación unitaria vertical en la mitad de la capa de mezcla asfáltica, carga aplicada de 60 kN y presión de inflado de 552 kPa

Tomado de: Clark, Leiva, Loría & Aguiar, 2018

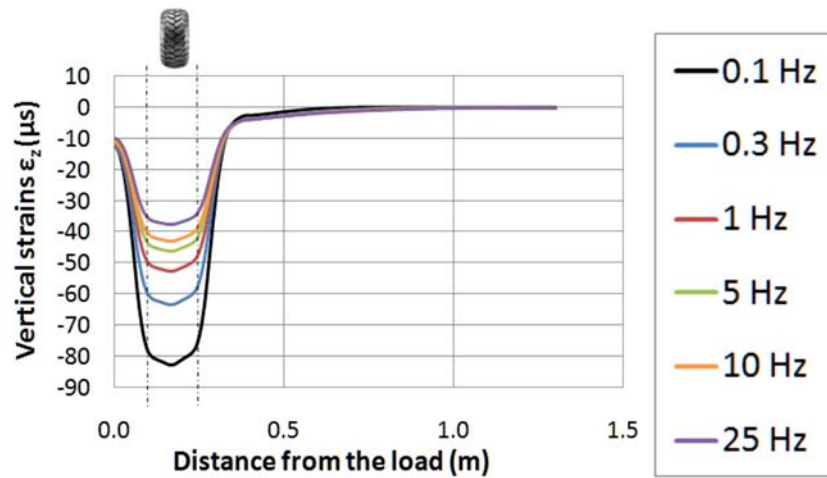


Figura 38. Deformación unitaria vertical en la mitad de la capa de mezcla asfáltica, carga aplicada de 60 kN y presión de inflado de 793 kPa

Tomado de: Clark, Leiva, Loría & Aguiar, 2018



Bibliografía

- Allen, J. (2013). *Propuesta de línea de investigación: determinación de parámetros de carga para diseño estructural de pavimentos de Costa Rica*. Unidad de Materiales y Pavimentos. Programa de Infraestructura del Transporte Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.
- Allen, J., & Badilla, G. (2011). Determinación de la Carga de Diseño para Pavimentos Flexibles en Costa Rica. *XVI CILA Congreso Iberoamericano del Asfalto*. IBP2134_11.
- Allen, J., & Sibaja, J. (2014). Presión de inflado de los neumáticos y la forma en que afecta el desempeño de la estructura de pavimento. *Congreso de Ingeniería Civil (CIC, 2014)* (págs. 175-185). San José, Costa Rica: Colegio Ingenieros Civiles.
- Allen, J., & Sibaja, L. (2014). *Presión de inflado de los neumáticos y la forma en que afecta la estructura del pavimento*. San José: LanammeUCR.
- Allen, J., & Vargas, C. (2014). *Determinación de la cantidad y ubicación de las estaciones de pesaje en la red vial nacional de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Unidad de Investigación en Infraestructura Vial, LanammeUCR.
- Allen, J., Vargas, C., & Sánchez, E. (2015). *Análisis exploratorio de la variación del factor camión mediante el control de sobrepeso en el transporte de carga para el diseño de pavimentos en Costa Rica*. San José: Unidad de Gestión Municipal. Programa de Infraestructura del Transporte Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.: AASHTO.

Informe LM-PI-USVT-06-2018	Fecha de emisión: 28 de setiembre de 2018	Página 98 de 103
----------------------------	---	------------------



- Arias-Barrantes, E., Sequeira-Rojas, W., Aguiar-Moya, J., Arriola-Guzman, R., Elizondo-Arrieta, F., & Loría-Salazar, G. (2014). *Recomendaciones técnicas para el diseño estructural de pavimentos flexibles con la incorporación de criterios mecánico-empíricos*. San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.
- Arrieta, J. (2015). *Encuesta de carga en rutas nacionales no reguladas por estaciones de pesaje. Propuesta de Trabajo Final de Graduación*. San José: Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.
- Arrieta, J. (2017). *Espectros de carga asociados a distintos tipos de vehículos pesados en rutas de la red vial estratégica nacional no reguladas por estaciones de pesaje*. San José: Trabajo Final de Graduación. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.
- Clark, D. (2016). *Análisis de la influencia de la presión de inflado sobre las respuestas críticas en el desempeño de los pavimentos flexibles*. San José: Trabajo Final de Graduación. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.
- Clark, D., Leiva, P., Loría, L., & Aguiar, P. (2018). Analysis of the tire pressure effect on flexible pavement's responses by means of FEM and APT instrumentation. *Advances in Materials and Pavement Performance Prediction*. Doha, Qatar.
- Elhanan, L. (2013). Effect of Super Single Tires on Tanzania Road Network . *Annual Road Convention*. Dar es Salaam, Tanzania,.
- Espinoza, J. C. (2013). *Determinación de factores camión y espectros de carga representativos de autobuses urbanos e interurbanos para diseño de pavimentos flexibles en carreteras de Costa Rica*. San Pedro, Costa Rica: Trabajo Final de Graduación. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.

- Federal Highway Administration (FHWA). (2013). *Traffic monitoring guide (Updated 2013)*. Washington D.C.: U.S.Department of Transportation.
- Fernando, E., Musani, D., Park, D., & Liu, W. (2006). *Evaluation of Effects of Tire Size and Inflation Pressure on Tire Contact Stresses and Pavement Response*. Texas, Estados Unidos: Texas Transportation Institute.
- Gillespe, T., Karamihas, S., Cebon, D., Sayers, M., Nasim, M., Hansen, W., & Ehsan, N. (1993). *Effects of Heavy Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance*. Michigan, Estados Unidos: Transportation Research Council.
- Hernandez-Vega, H., Jimenez-Romero, D., Aguiar-Moya, J. P., & Loría-Salazar, L. G. (2016). *Determinación de Parámetros de Carga para diseño estructural de Pavimentos en Costa Rica. Informe de Avance LM-PI-USVT-003-16*. San Pedro, Montes de Oca: Programa Infraestructura del Transporte. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Universidad de Costa Rica.
- Hernandez-Vega, H., Jimenez-Romero, D., Aguiar-Moya, J. P., & Loría-Salazar, L. G. (2017). *Determinación de Parámetros de Carga para diseño estructural de Pavimentos en Costa Rica. Informe de Avance LM-PI-USVT-004-17*. San Pedro, Montes de Oca: Programa Infraestructura del Transporte. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Universidad de Costa Rica.
- Hernández-Vega, H., Morales-Aguilar, M., Jiménez-Romero, D., Leiva-Villacorta, F., & y Loria-Salazar, L. G. (2016). *Análisis descriptivo de patrones de velocidad a partir de datos de estaciones permanentes de monitoreo del tránsito de Costa Rica LM-PI-USVT-002-16*. San Pedro, Montes de Oca: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.

- Hernández-Vega, H., Vargas-Sobrado, C., Aguiar-Moya, J., Jiménez-Romero, D., & Loría-Salazar, L. (2016). Avance del proyecto de investigación: determinación de parámetros de carga para diseño de estructuras de pavimentos en Costa Rica. *Congreso de Ingeniería Civil*. Heredia: Colegio de Ingenieros Civiles.
- Huang, Y. (2003). *Pavement Analysis and Design: Second Edition*. Estados Unidos: Pearson Prentice Hall.
- Kim, D., Salgado, R., & Altschaeffl, A. (2005). *Effects of Supersingle Tire Loadings on Pavements*. *Journal of Transportation Engineering*, 115(4), 329-350.
- Kim, O. K., Bell, C. A., & Wilson, J. E. (1989). *Effect of Increased Truck Tire Pressure on Asphalt Concrete Pavement*. *Journal of Transportation Engineering*, 115(4), 329-350.
- Leiva, F., & Morris, V. (2016). Determinación del desplazamiento lateral de vehículos en carreteras urbanas de Costa Rica. *Infraestructura Vial LanammeUCR*, 5-11.
- Magaña, J. (2014). *Determinación de patrones típicos de distribución temporal de tránsito en Costa Rica*. San Jose, Costa Rica: Trabajo Final de Graduación. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.
- Mata, N. (2018). *Externalidades ambientales, en seguridad vial y en infraestructura del transporte de carga ferroviaria en la zona atlántica costarricense*. San José: Trabajo Final de Graduación. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.
- Morales, M., & Hernandez, H. (2016). *Patrones de velocidad a partir de datos de estaciones permanentes de monitoreo del tránsito de Costa Rica*. San Jose: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

- Morris, V. (2016). *Determinación del desplazamiento lateral de vehículos en carreteras urbanas de Costa Rica*. San Pedro, Montes de Oca: Trabajo Final de Graduación. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.
- Oconitrillo, E. (2018). *Uso de sensores ultrasónicos en la medición de desplazamiento lateral vehicular en diferentes secciones de la Red Vial Nacional Primaria de Costa Rica. Trabajo Final de Graduación*. San José: Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.
- Owende, P., Hartman, A., Ward, S., Gilchrist, M., & O'Mahony, M. (2001). *Minimizing Distress on Flexible Pavements Using Variable Tire Pressure*. Journal of Transportation Engineering, 254-262.
- Regehr, J. (2011). *Understanding and anticipating truck fleet mix characteristics for mechanical-empirical pavement design*. Washington D.C.: Transportation Research Board 2011 Annual Meeting.
- Rodríguez, L. (2018). *Desarrollo de espectros de carga para la red vial cantonal*. San José: Trabajo Final de Graduación. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.
- Said, S., & Hakim, H. (2012). *Influence of Traffic Variables on Rut Formation In Asphalt Concrete Layers*. Estocolmo, Suecia: International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology - HVTT12.
- Sibaja, L. (2014). *Determinación de presión de neumáticos de vehículos de carga típicos de Costa Rica*. San José: Trabajo Final de Graduación. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.
- Stempihar, J., Williams, R. C., & Drummer, T. (2005). *Quantifying the lateral displacement of trucks for use in pavement design*. Michigan : Michigan Technological University.

- Ulloa, A., Allen, J., Badilla, G., & Sibaja, D. (2008). *Determinación de factores camión en pavimentos en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Infraestructura Vial, 10 (19), 28-37.
- Wang, F. (2005). *Mechanistic-Empirical Study of Effects of Truck Tire Pressure on Asphalt Pavement Performance*. Texas, Estados Unidos: University of Texas at Austin.
- Wang, F., & Machemehl, R. (2003). *The Current Status and Variability of In-Service Truck Tire Pressures in Texas*. Washington D.C, Estados Unidos: 82nd Transportation Research Board Meeting.
- Wang, H. (2011). *Analysis of Tire-Pavement Interaction and Pavement Responses Using a Decoupled Modeling Approach*. Illinois: Urbana.
- Ward, J. H. (1963). *Hierarchical grouping to optimize an objective function*. Journal of the American Statistical Association, 58(301), 236-244.
- Weijermars, W. (2007). *Analysis of urban traffic patterns using clustering*. Enschede, Holanda: Tesis para proporcionar el grado de doctorado, Universidad de Twente.